



PORTI  
di ROMA  
e del LAZIO

**AUTORITA' PORTUALE DI CIVITAVECCHIA**  
Via Molo Vespucci – 00053 Civitavecchia ( RM)

**OPERE STRATEGICHE PER IL PORTO DI CIVITAVECCHIA**  
**1° LOTTO FUNZIONALE**  
***PROLUNGAMENTO ANTEMURALE C. COLOMBO,***  
***DARSENA SERVIZI E TRAGHETTI***

*Verifica di Attuazione*  
*ai sensi dell'art. 185 commi 6 e 7 del D.Lgs. 163/06*  
*delle prescrizioni contenute del parere positivo del Ministero dell'Ambiente*  
*e della Tutela del Territorio e del Mare*  
*(Prot. DSA-2006-0021173 del 08/08/2006)*

**ALLEGATO N. 3**



Autorità Portuale di Civitavecchia - AP.CFG.A01

Prot. **0017851** del 17/12/2012 ore 16:35

Tit. 013

Documento P - Registro: Arrivo

All' **Autorità Portuale**

Molo Vespucci, snc

00053 Civitavecchia

c.a. *Dott. Giorgio Fersini*

Civitavecchia, lì 13.12.2012

**Oggetto:** Circoscrizione portuale di Civitavecchia; addendum n. 3 del 11.01.2012 alla convenzione del 10.12.2003.

**CIG:** 382180091F.

Con la presente, si trasmette in allegato la relazione "Studio ondametrico lungo il tratto di costa compreso tra Punta del Pecoraro e Capo Linaro".

Distinti saluti,

Prof. Marco Marcelli

ORIGINALI PRESSO FERSINI

17/12/2012

PORTI  
di ROMA  
nel VAZIO

RICEV  
17 DIC 2012 16:52

**Studio ondametrico lungo il tratto di costa  
compreso tra Punta del Pecoraro e  
Capo Linaro**

## OGGETTO

# STUDIO ONDAMETRICO DEL TRATTO DI COSTA COMPRESO TRA PUNTA DEL PECORARO E CAPO LINARO ATTRVERSO L'ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI E L'USO DI MODELLI NUMERICI

**Dicembre 2012**

Riferimento	Data	Num. Pag.	Revisione
REL-99.0-MOD-1212-APC	13/12/2012	48	1.0
Redatto			
Dott. Simone Bonamano			
Dott. Filippo Maria Carli			
Dott. Francesco Paladini de Mendoza			
Verificato e approvato			
Prof. Marco Marcelli			
<p>Dipartimento di Scienza Ecologiche e Biologiche (DEB) L.go dell'Università s.n.c VT) Tel/Fax +39 0766 366538 <a href="mailto:oceanlab@unitus.it">oceanlab@unitus.it</a></p>			

## INDICE

<b>1. PREMESSA</b>	<b>1</b>
<b>2. OGGETTO E SCOPO</b>	<b>2</b>
<b>3. AREA DI STUDIO</b>	<b>2</b>
<b>3.1 DESCRIZIONE MORFOLOGIA</b>	<b>3</b>
<b>3.2 DESCRIZIONE ANEMOMETRICA</b>	<b>4</b>
<b>3.3 DESCRIZIONE ONDAMETRICA</b>	<b>14</b>
<b>3.4 DESCRIZIONE DELLA CORRENTE GENERALE</b>	<b>24</b>
<b>4. MATERIALE E METODI</b>	<b>26</b>
<b>4.1 ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI</b>	<b>26</b>
<b>4.2 DESCRIZIONE DEL MODELLO STWAVE</b>	<b>28</b>
<b>4.2.1 LE EQUAZIONI DEL MODELLO</b>	<b>28</b>
<b>4.2.2 FORZANTI E CONDIZIONI AL CONTORNO</b>	<b>31</b>

<b>5. RISULTATI</b>	<b>32</b>
<b>5.1 RISULTATI DELLA STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI</b>	<b>32</b>
<b>5.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE</b>	<b>37</b>
<b>6. CONCLUSIONI</b>	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>48</b>
<b>CARTE</b>	<b>48</b>



Laboratorio di Oceanologia Sperimentale  
ed Ecologia Marina (DEB)  
Università della Tuscia  
REL-99.0-MOD-1212-APC



## 1. Premessa

Gli studi ondametrici, ovvero analisi dettagliate sugli spettri d'onda che raggiungono un determinato tratto di costa, sono alla base della maggior parte dei progetti di opere antropiche realizzate in mare, e soprattutto in aree costiere.

In uno studio di questo tipo vengono presi in considerazione i principali parametri descrittivi del moto ondoso, in particolare altezza d'onda significativa, periodo medio e direzione di provenienza della mareggiata; un altro parametro significativo, fondamentale per il dimensionamento delle opere da realizzare, è il tempo di ritorno degli eventi estremi. In aree definite, mareggiate descritte da altezze d'onda al di sopra di caratteristici valori di soglia, ritornano con intervalli di tempo ipotizzabili su basi statistiche. L'altezza e il tempo di ritorno di tali eventi estremi ha un peso determinante nella progettazione di diverse tipologie di intervento sulla zona costiera.

Gli studi ondametrici vengono svolti a supporto della progettazione di molte tipologie di intervento: porti, dighe foranee, darsene, opere di protezione costiera, ripascimenti, opere ingegneristiche di varia natura. Questi interventi devono essere supportati da una dettagliata analisi del clima d'onda a largo e in corrispondenza della zona costiera che suggerisca sia la dimensione dell'opera, e gli eventuali sistemi di ancoraggio, sia la possibile individuazione del sito idoneo, giacché, in aree costiere, la propagazione dell'onda in acque basse può cambiare anche drasticamente a causa dei fenomeni di shoaling, diffrazione, rifrazione e frangimento che possono essere simulati attraverso modelli numerici.

Va però sottolineato come la stima dei tempi di ritorno deve essere continuamente aggiornata sulla base di nuove acquisizioni che, nel caso comprendono eventi più intensi rispetto a quelli precedentemente registrati, può portare a risultati diversi rispetto a quelli prospettati. Tale situazione si è verificata lungo le coste tirreniche dell'Italia centrale in cui tra Ottobre e Novembre del 2012 sono state registrate dalle boe ondametriche di Capo Linaro e di Ponza (Rete Ondametrica Nazionale gestita da ISPRA) valori relativi all'altezza d'onda significativa più elevati rispetto a quelle presenti nell'intera serie storica. Tali valori sono risultati superiori a quelli ottenuti dalla stima dei tempi di ritorno a 20 anni effettuata sulla base delle misure effettuate fino alla primavera del 2012.



Laboratorio di Oceanologia Sperimentale  
ed Ecologia Marina (DEB)  
Università della Tuscia  
REL-99.0-MOD-1212-APC



## **2. Oggetto e scopo**

Il presente lavoro consiste di un'analisi delle caratteristiche descrittive del clima d'onda incidente sulla fascia costiera del Lazio settentrionale, ed in particolare lungo il tratto di costa compreso tra Punta del Pecoraro e Capo Linaro. Tale analisi è basata sull'interpretazione statistica dei dati prodotti dalle boe ondometriche di Capo Linaro (Rete Ondametrica Nazionale, ISPRA) e di Torre Valdaliga (centrale ENEL di Civitavecchia) al fine di determinare i tempi di ritorno degli eventi estremi per diverse direzioni di propagazione del moto ondoso.

Tali eventi sono stati simulati attraverso il modello numerico STWAVE per analizzare la propagazione dell'onda in acque basse e i suoi relativi effetti sulla dinamica litoranea.

In particolare è stato riprodotto l'effetto nella zona di studio della propagazione di un'onda proveniente da Libeccio con un'altezza di 7.8 m, che costituisce l'evento più intenso tra quelli registrati sia dalla boa di Capo Linaro sia da quella di Torre Valdaliga.

In tale contesto saranno presi in considerazione l'altezza d'onda significativa, la direzione di provenienza e il periodo di picco, mentre lo studio della corrente litoranea indotta dal moto ondoso e il trasporto solido ad esso associato sono in corso d'opera e saranno oggetto di lavori successivi.

## **3. Area di studio**

L'area di studio, oggetto del presente lavoro, si estende tra Punta del Pecoraro (a nord) e Capo Linaro (Fig. 1), ed è compresa lungo la fascia costiera del Lazio settentrionale.



Fig. 1 :Area di studio.

Tale area è caratterizzata dalla presenza del porto turistico di Riva di Traiano, che con la sua diga foranea determina una modificazione del regime idrodinamico a scala locale; inoltre, il regime del moto ondoso e delle correnti è largamente influenzato dalla morfologia di Capo Linaro, che si comporta come una barriera naturale per tutti gli eventi di moto ondoso provenienti da Scirocco e, più in generale, dal secondo quadrante.

### 3.1. Descrizione morfologica

Il tratto di costa oggetto di studio è compreso nell'unità fisiografica che si estende da Capo Linaro al Promontorio dell'Argentario, dove sono presenti terrazzi e rilievi montuosi ai due estremi, rispettivamente dalla zona a sud di Civitavecchia fino alla zona a nord della foce del Mignone (terrazzi) e all'estremità nord dell'unità fisiografica in corrispondenza dell'area del Monte Argentario (rilievi). Le parti rimanenti sono dominate da pianure alluvionali. Più in generale, l'intero litorale laziale è considerato da Caputo (1991) diviso in due sezioni, una a nord e una a sud del delta tiberino, poiché il tratto settentrionale è regolato dagli apporti solidi fluviali, che producono nel tempo accumuli di corpi sedimentari, mentre nel tratto meridionale si riscontrano "spiagge fossili" il cui livello si è stabilizzato circa 6000 anni fa.

La ricostruzione batimetrica del fondale nell'area di studio è stata effettuata utilizzando due differenti fonti di dati:

- campagne batimetriche di dettaglio, eseguite con ecoscandaglio single-beam di precisione, tra la linea di costa e i 30 m di profondità;
- carta nautica 1:100000 “Promontorio dell'Argentario – Capo Linaro”, come integrazione dei dati batimetrici oltre i 30 m di profondità.

L'elaborazione e l'interpolazione dei dati ha permesso di redigere la mappa batimetrica della zona di studio, rappresentata nella seguente figura 2.

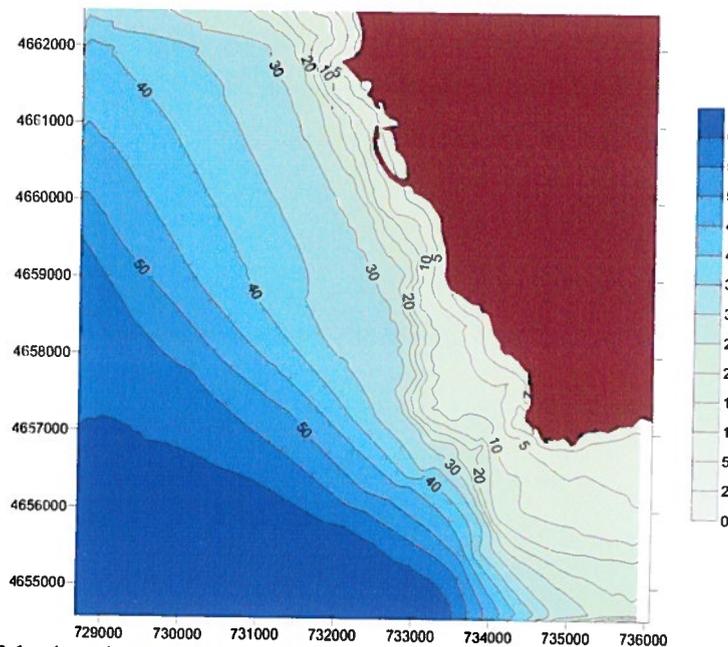


Fig. 2 : Morfologia subacqueo lungo il tratto di costa tra Punta del Pecoraro a Capo Linaro.

### 3.2. Descrizione anemometrica

I dati meteorologici disponibili nell'area di studio provengono da diverse fonti quali:

- Aeronautica Militare (CNMCA);
- Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale (ISPRA);
- Autorità Portuale di Civitavecchia.



La centralina meteo dell'Aeronautica Militare, che è posizionata in corrispondenza di Capo Linaro, ha acquisito una lunga serie storica di dati anemometrici. Di seguito vengono riportati, attraverso la rosa dei venti, le rilevazioni effettuate tra il 1951 e il 1981 (Fig. 3) e i dati acquisiti tra il 1985 e il 2008 (Fig. 4).

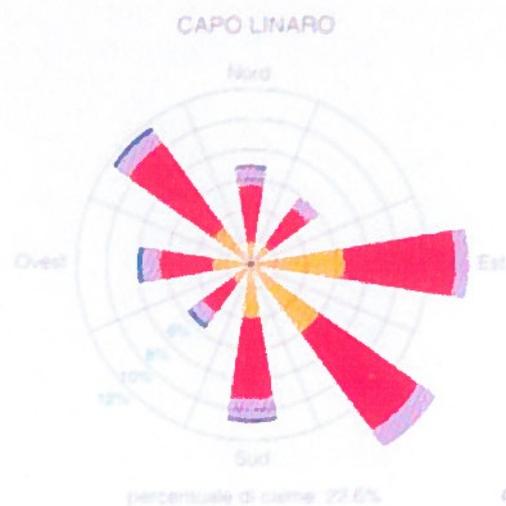


Fig.3 :Rosa dei venti registrata dalla stazione meteo dell'Aeronautica Militare a Capo Linaro nel periodo 1951-1981.

Dall'analisi delle rilevazioni effettuate tra il 1951 e il 1981 viene messo in evidenza che i venti dominanti (a cui è associata la maggiore intensità) appartengono al III e IV quadrante (Mezzogiorno, Libeccio, Ponente e Maestrale) mentre quelli regnanti (che hanno una maggiore frequenza) sono stati registrati nel II quadrante.

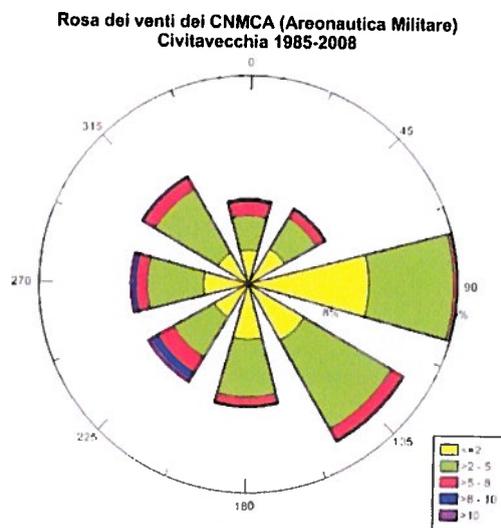


Fig.4 :Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dal 1985 al 2008.

Analizzando i dati forniti dall'Aeronautica Militare per il periodo tra il 1985 e il 2008 viene confermata la tendenza del trentennio precedente. Nella rosa dei venti in basso (Fig. 4) si evince come i venti che hanno un'intensità maggiore di 10 m/s sono il Libeccio, il Ponente e il Maestrale mentre quelli che risultano avere una maggiore frequenza sono il Levante e lo Scirocco.

Allo scopo di stimare la variabilità stagionale del clima anemometrico, i dati trentennali di Civitavecchia sono stati raggruppati in classi stagionali, ed in particolare: i dati acquisiti tra i mesi Ottobre-Marzo sono stati identificati con il periodo autunnale ed invernale, mentre quelli acquisiti tra Aprile-Settembre sono rappresentativi del periodo primaverile ed estivo.

Dall'analisi delle rose dei venti stagionali (Fig. 5, 6, 7, 8), si riscontrano distribuzioni simili nei periodi autunno-inverno e primavera-estate. Nel primo caso i fenomeni dominanti sono relativi ai venti di Libeccio e a quelli del IV quadrante, mentre quello più frequente corrisponde al Levante. L'unica differenza tra autunno e inverno riguarda i venti più intensi: mentre in autunno il fenomeno dominante risulta essere il Libeccio, in inverno assumono rilievo anche i venti di Maestrale e Tramontana.

Nel periodo estivo-primaverile invece l'intensità dei venti è più bassa rispetto alle stagioni inverno-autunno e quindi di conseguenza aumentano le calme e i fenomeni regnanti che riguardano lo Scirocco e il Maestrale. Una considerazione a parte va fatta per il Ponente e il Levante che in corrispondenza di questo periodo hanno un'elevata frequenza probabilmente dovuta ai fenomeni di



brezza che sono particolarmente intensi in questo periodo dell'anno.

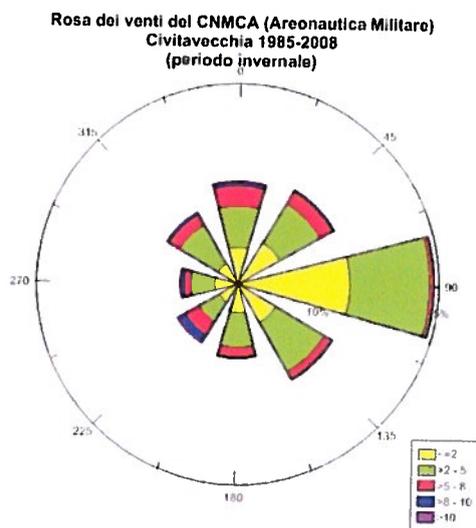


Fig 5 :Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dal 1985 al 2008 (periodo invernale)

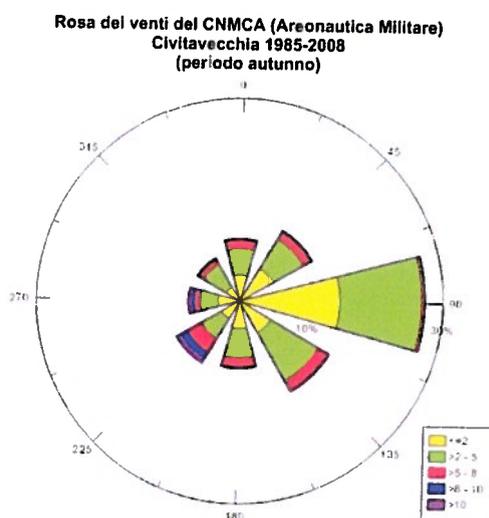


Fig. 6:Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dal 1985 al 2008 (periodo autunnale).

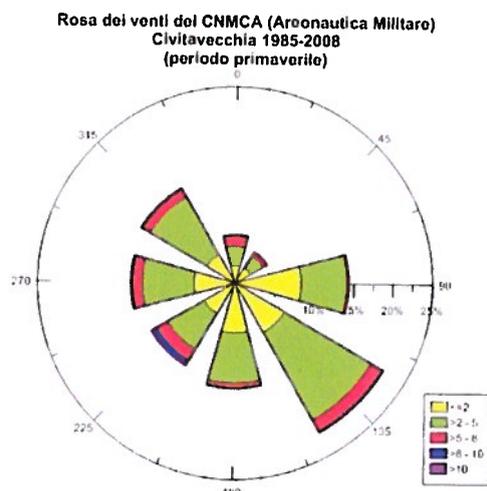


Fig. 7 : Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dal 1985 al 2008 (periodo primaverile).

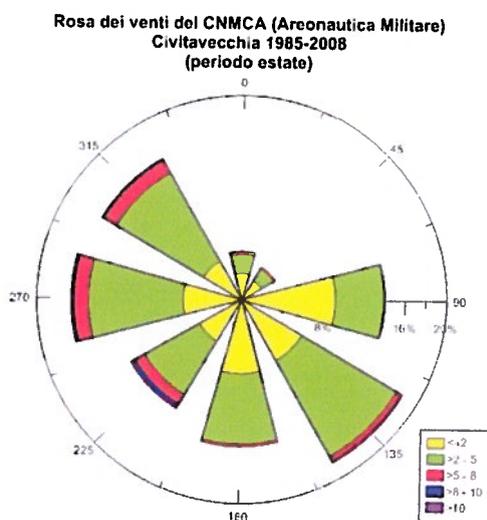


Fig. 8 :Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dal 1985 al 2008 (periodo estivo).

I dati della RMN sono a cadenza oraria, comprendono l'intervallo di tempo che va dal 1998 al 2012 (Fig. 9) e sono stati acquisiti dalla centralina meteo posta all'interno del porto di Civitavecchia.

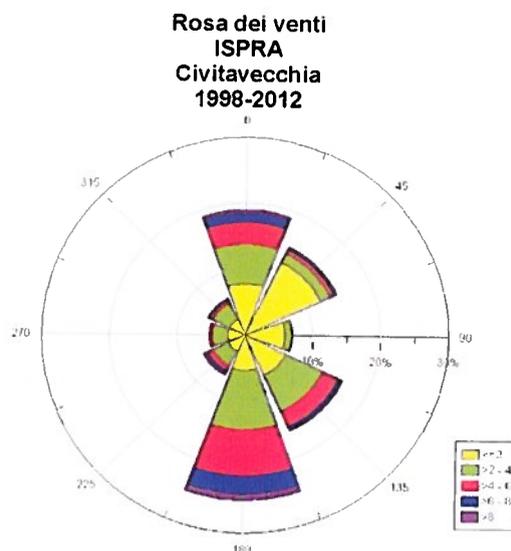


Fig. 9: Rosa dei venti misurata a Civitavecchia da ISPRA (RMN) tra il 1998 e il 2012.

Dall'analisi del clima anemometrico della stazione meteo di ISPRA si nota che gli eventi prevalenti sono relativi alla direzione di Tramontana e Mezzogiorno mentre elevate intensità sono evidenti anche per la direzione di Libeccio.

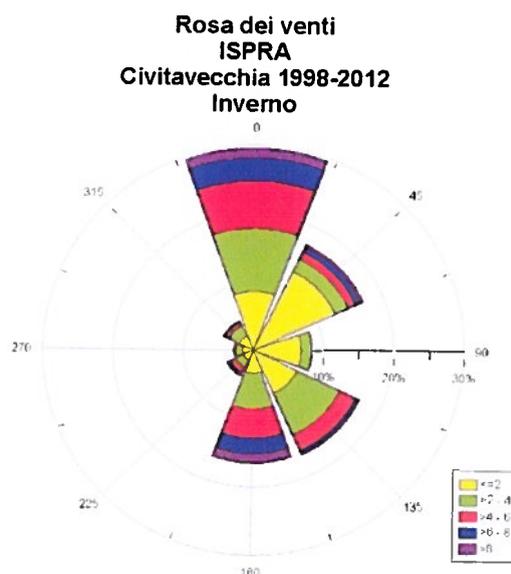


Fig.10 : Rosa dei venti misurata a Civitavecchia da ISPRA (RMN) tra il 1998 e il 2012 (periodo invernale).

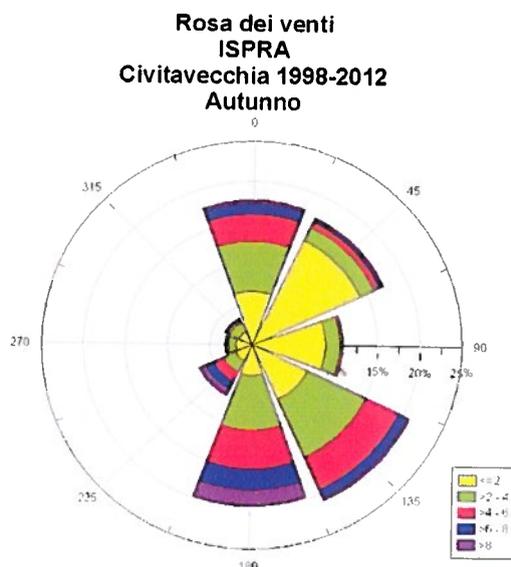


Fig.11: Rosa dei venti misurata a Civitavecchia da ISPRA (RMN) tra il 1998 e il 2012 (periodo autunnale).

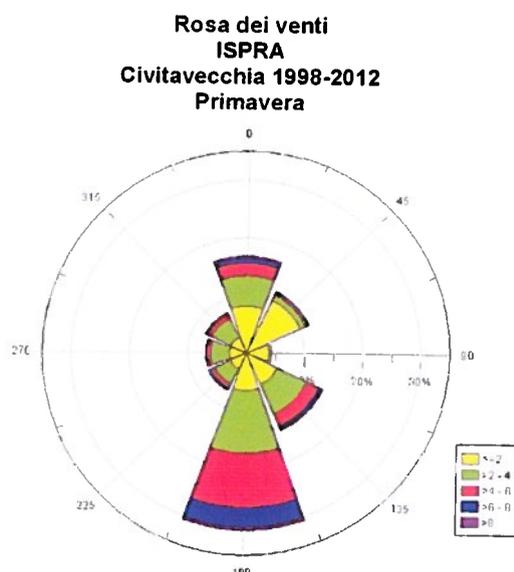


Fig.12: Rosa dei venti misurata a Civitavecchia da ISPRA (RMN) tra il 1998 e il 2012 (periodo primaverile).

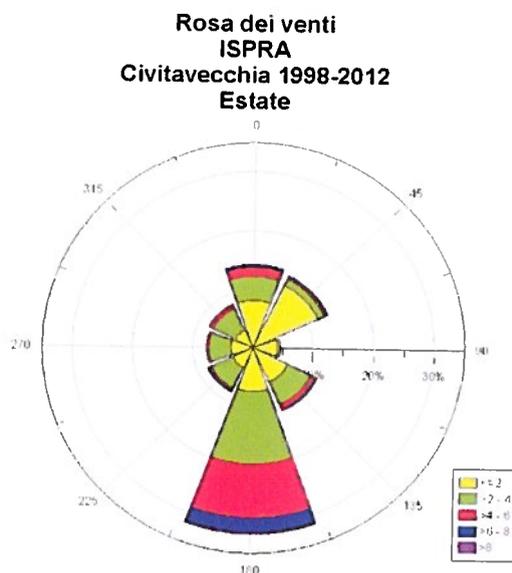


Fig. 13: Rosa dei venti misurata a Civitavecchia da ISPRA (RMN) tra il 1998 e il 2012 (periodo estivo).

In inverno (Fig. 10), in primavera (Fig. 12) ed in estate (Fig. 13) i venti prevalenti hanno la stessa direzione rispetto al clima anemometrico registrato in tutto l'arco di tempo tra il 1998 e il 2012, in particolare nel corso della stagione estiva e di quella primaverile il Mezzogiorno evidenzia una frequenza nettamente maggiore della Tramontana. In autunno (Fig. 11) invece la provenienza dei dati di vento si distribuisce più omogeneamente su tutto lo spettro di direzioni prediligendo quelle relative ai quadranti orientali.

Negli ultimi anni sono state posizionate dall'Autorità Portuale di Civitavecchia presso i porti di Civitavecchia, Gaeta e Fiumicino delle centraline meteo capaci di restituire ad intervalli di 10 minuti dati relativi alla pressione atmosferica, umidità relativa, velocità e direzione del vento, radiazione solare e precipitazione.

In particolare la centralina meteorologica di Civitavecchia è stata installata all'interno del porto sul tetto dell'edificio sede dell'Autorità Portuale ed è in funzione dal 2007. Attraverso l'analisi di questi dati è possibile descrivere l'entità dei fenomeni che ha caratterizzato il periodo attuale che va dal 2008 a Dicembre del 2012 (Fig. 14).

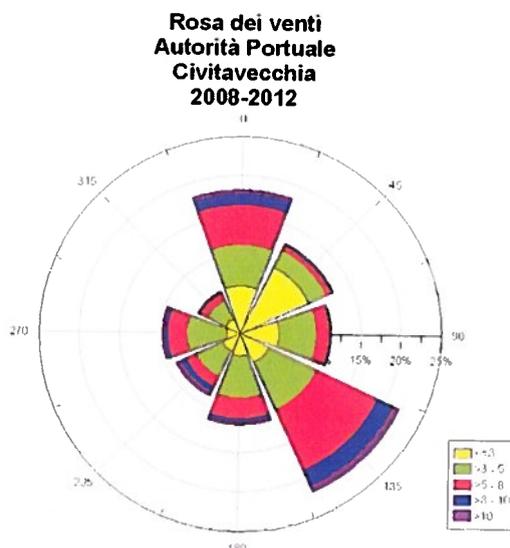


Fig. 14: Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dall'Autorità Portuale dal 2008 al 2012.

Negli ultimi quattro anni il clima anemometrico registrato dalla centralina meteo dell'Autorità Portuale di Civitavecchia mostra che i fenomeni prevalenti, a cui viene associata la massima intensità e frequenza, provengono da Tramontana ( $0^{\circ}$ N) e da Scirocco ( $135^{\circ}$ N). Si nota inoltre che anche i venti relativi al III quadrante hanno un'elevata intensità.

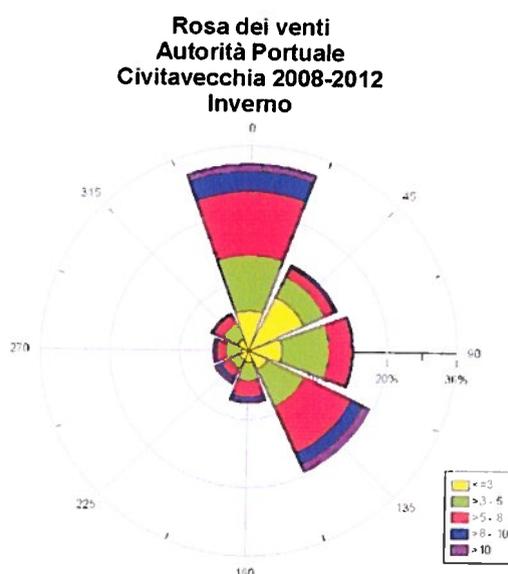


Fig. 15 : Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dall'Autorità Portuale dal 2008 al 2012 (periodo invernale).

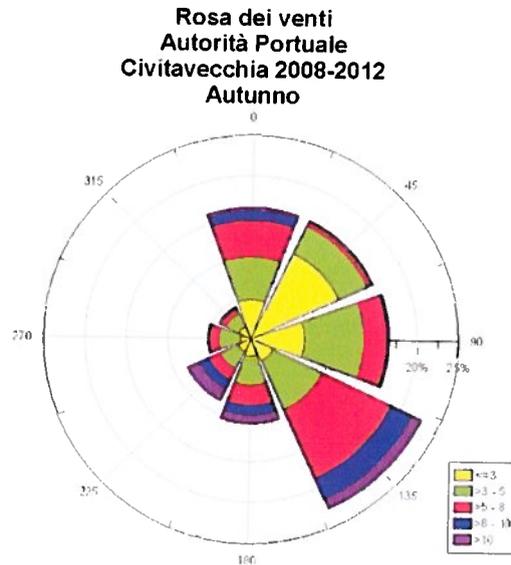


Fig. 16: Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dall'Autorità Portuale dal 2008 al 2012 (periodo autunnale).

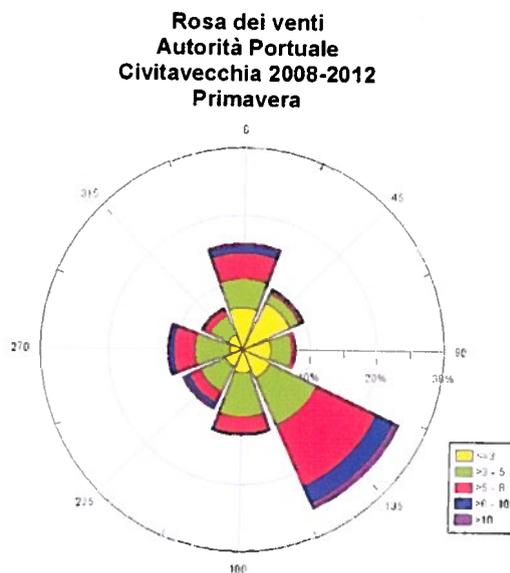


Fig. 17 : Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dall'Autorità Portuale dal 2008 al 2012 (periodo primaverile).

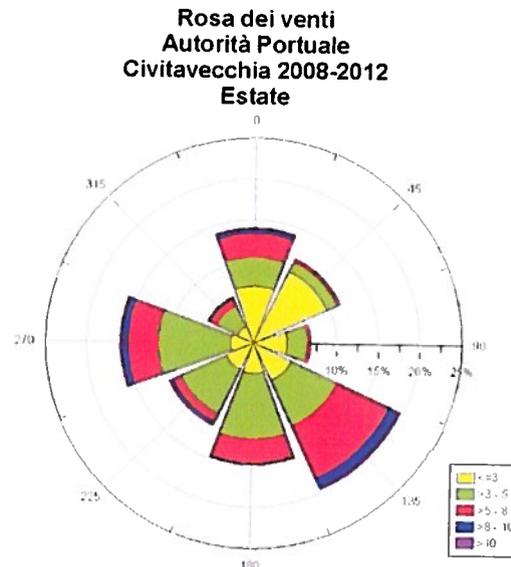


Fig. 18 :Rosa dei venti misurata a Civitavecchia dall'Autorità Portuale dal 2008 al 2012 (periodo estivo).

Dall'analisi stagionale (Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17 e Fig. 18) del dataset acquisito dall'anemometro dell'Autorità Portuale si evince come in inverno ed in autunno i fenomeni prevalenti provengano dal I e II quadrante con elevati valori di intensità anche per i venti di Mezzogiorno, Libeccio e Scirocco soprattutto nella stagione autunnale. In primavera si registra invece un aumento della frequenza degli eventi provenienti dai quadranti occidentali mentre in estate si verifica una drastica diminuzione delle intensità e una più equa distribuzione tra le diverse direzioni.

L'analisi delle condizioni anemometriche risulta essenziale per la ricostruzione del moto ondoso e come dati di input dei modelli idrodinamici che, accoppiati con i modelli di moto ondoso, saranno utilizzati per descrivere i processi legati alla dinamica costiera.

### 3.2. Descrizione ondometrica

L'analisi della serie storica del clima d'onda è stata effettuata sulla base di dati acquisiti in due punti lungo il tratto di costa compreso tra Capo Linaro e Punta S.Agostino. Attraverso le suddette boe ondometriche, gestite rispettivamente dall'Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale (ISPRA) e dalla Centrale ENEL di Torrevaldaliga, sono stati rilevati l'altezza d'onda

significativa, la direzione di provenienza del moto ondoso e il periodo di picco. Nella figura 19 viene rappresentata la posizione dei due ondometri.

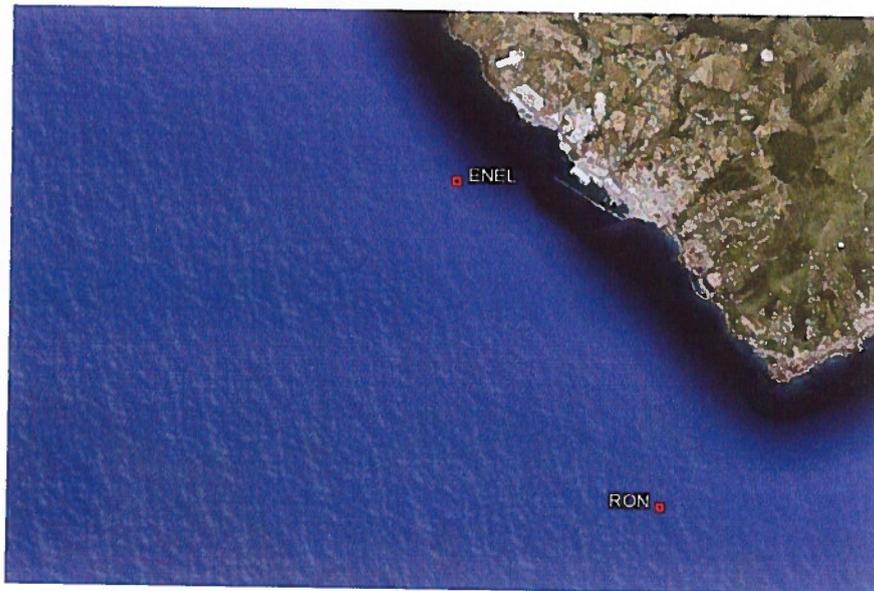


Fig. 19 : Posizione delle due boe ondametrichi.

I periodi di acquisizione dei dati relativi alle due boe vengono riportate nella tabella 1 da cui si evince che le rilevazioni si sovrappongono solo nel periodo che va dal 2010 al 2011.

Ondametro	Periodo di rilevazione
Capo Linaro (ISPRA-RON)	2004-2006 e 2008-2012
Civitavecchia (Centrale ENEL di Torrevaldaliga)	1994-2001 e 2010-2011

Tab 1 : Intervalli di tempo in cui sono state effettuate le rilevazioni

I dati raccolti durante il periodo di sovrapposizione saranno utilizzati per calibrare il modello numerico STWAVE che verrà descritto successivamente. La calibrazione del modello sarà prodotta in una seconda fase.

Lo studio dell'esposizione del tratto costiero oggetto di studio (Fig. 20) viene effettuato ponendosi a largo di Civitavecchia su fondali di circa – 50 m, ad una distanza di circa 4 km dalla costa (Noli et al, 1996). In tale punto il paraggio è esposto al mare aperto per un ampio settore di

traversia, delimitato a nord ovest dal promontorio del Monte Argentario e dall'Isola d'Elba ( $300^{\circ}$ - $320^{\circ}$  N), a est dall'isola della Corsica ( $280^{\circ}$ - $260^{\circ}$  N), a sud-ovest dall'isola della Sardegna ( $250^{\circ}$ - $210^{\circ}$  N), a sud dall'isola della Sicilia ( $145^{\circ}$ - $170^{\circ}$  N) a una distanza di circa 500 Km e a sud-est da Capo Anzio, dall'isola di Ponza e dalla costa calabrese ( $135^{\circ}$ - $145^{\circ}$  N).

Per il tratto di costa dell'alto Lazio a fronte di un fetch geografico massimo dell'ordine di 500 Km si ha un fetch efficace massimo pari a circa 310 Km circa ed è riferibile al settore sud ( $170^{\circ}$ - $190^{\circ}$  N, Mezzogiorno).

Per quanto riguarda la correlazione tra la direzione del vento e direzione del mare si può notare che venti di Maestrale (paralleli alla costa da nord-ovest), generano moti ondosi provenienti da  $290^{\circ}$ - $280^{\circ}$  N (Ponente) con uno sfasamento di circa  $30^{\circ}$  e venti di Scirocco (paralleli alla costa sud-est) generano moti ondosi provenienti da  $150^{\circ}$ - $160^{\circ}$  N (Mezzogiorno) con uno sfasamento di  $25^{\circ}$  (Di Girolamo et al., 1991).

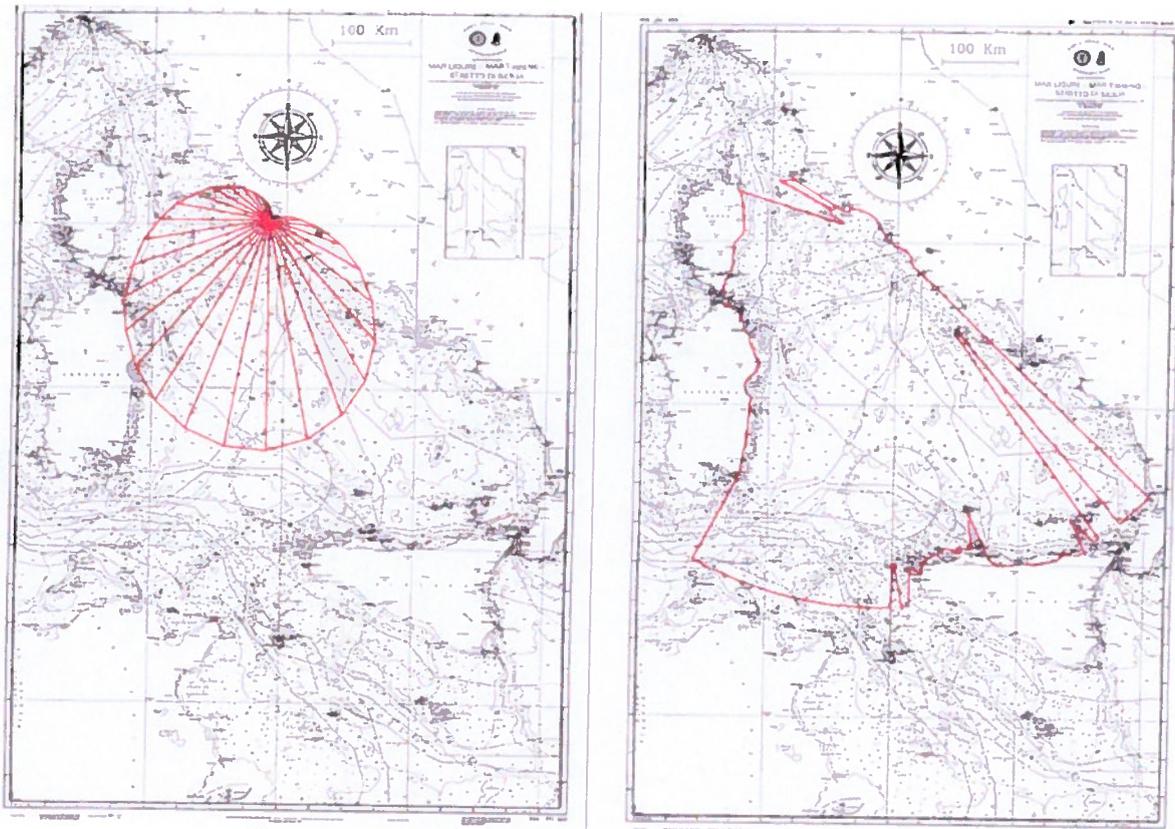


Fig.20 : Fetch geografico ed efficace a largo di Civitavecchia.



Di seguito viene riportato l'andamento dei dati ondametrici relativi alla boa di Capo Linaro (RON-ISPRA) attraverso l'analisi del clima d'onda (Fig. 21).

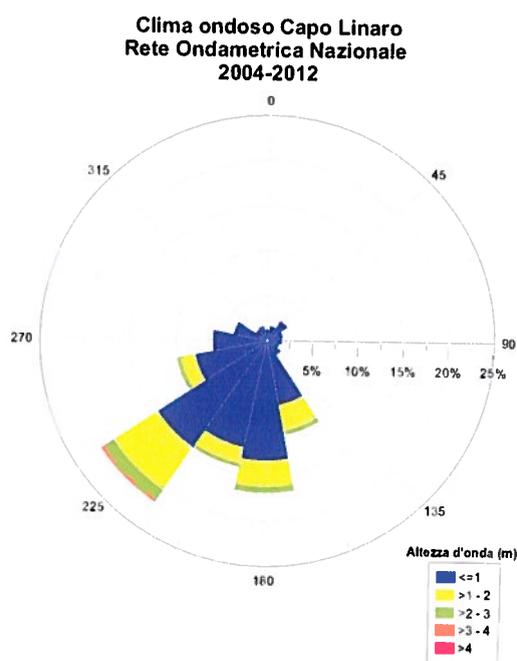


Fig. 21 :Clima d'onda registrato dalla boa ondametrica di Capo Linaro (ISPRA-RON) tra il 2004 e il 2012

Dall'osservazione della distribuzione delle altezze e delle frequenze all'interno del clima d'onda, è possibile trarre alcune conclusioni: le mareggiate regnanti, ovvero quelle che si presentano con la maggiore frequenza, sono quelle che hanno direzioni di provenienza comprese tra  $170^\circ$  e  $240^\circ$ , con un'altezza d'onda che per la maggior parte degli eventi non supera 1 m. Tra queste direzioni non sono rare anche mareggiate di maggiore intensità, con eventi caratterizzati da  $H_s$  compresa tra 1 m e 2 m che si ripetono con buona frequenza. Per questi stati di mare non è da trascurare l'apporto delle mareggiate provenienti dal secondo quadrante, ed in particolare tra  $140^\circ$  e  $180^\circ$ . Per quanto riguarda le mareggiate dominanti, ovvero quelle che si segnalano per le maggiori altezze d'onda ( $>2$  m), provengono principalmente dal settore compreso tra  $140^\circ$  e  $260^\circ$  ma la frequenza con cui si registrano è sensibilmente maggiore nel settore compreso tra  $215^\circ$  e  $235^\circ$ . Dalla stessa direzione provengono anche le principali mareggiate con altezza superiore a 3m.

Per effettuare un'analisi più dettagliata il clima d'onda è stato suddiviso in classi stagionali (Fig.



22, Fig. 23, Fig. 24 e Fig. 25).

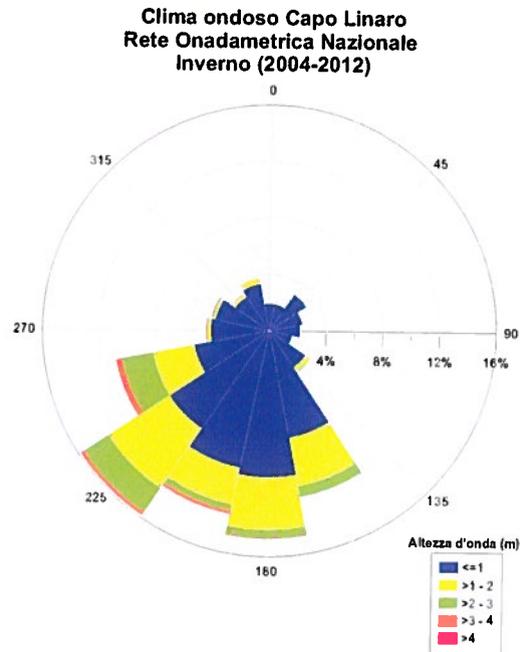


Fig. 22 : Clima d'onda registrato dalla boa ondametrica di Capo Linaro (ISPRA-RON) tra il 2004 e il 2012 (periodo invernale).

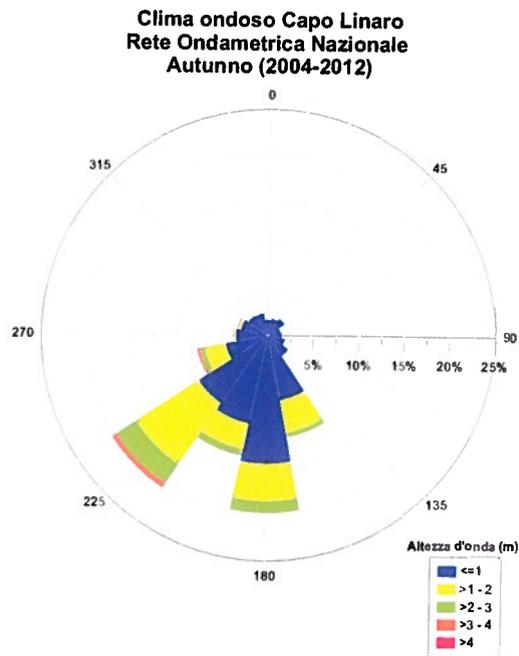


Fig. 23 :Clima d'onda registrato dalla boa ondametrica di Capo Linaro (ISPRA-RON) tra il 2004 e il 2012 (periodo autunnale).

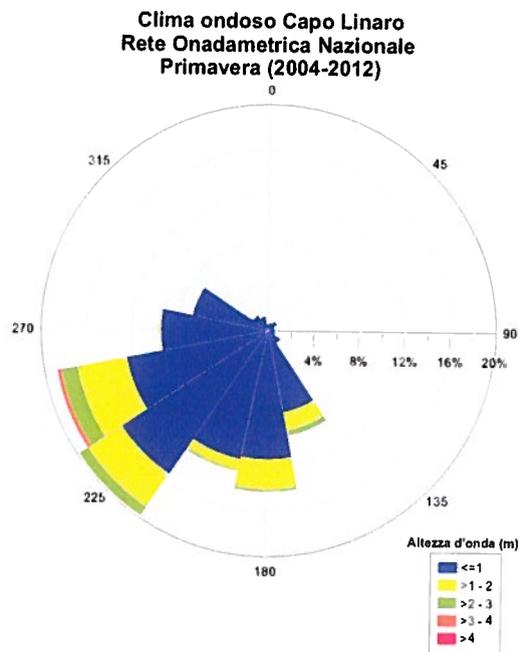


Fig. 24 :Clima d'onda registrato dalla boa ondametrica di Capo Linaro (ISPRA-RON) tra il 2004 e il 2012 (periodo primaverile).

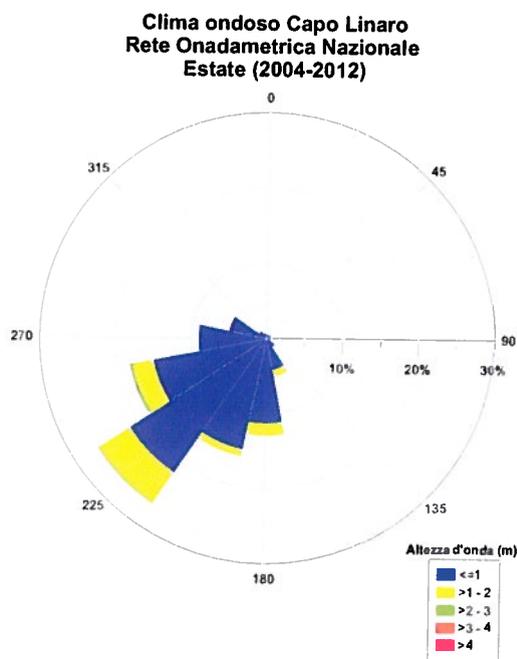


Fig. 25: Clima d'onda registrato dalla boa ondametrica di Capo Linaro (ISPRA-RON) tra il 2004 e il 2012 (periodo estivo).



Per quanto riguarda il clima d'onda stagionale, rappresentativo dei dati prodotti dalla boa ondometrica di Capo Linaro, risulta evidente come la direzione da cui provengono gli stati di mare con la maggiore frequenza è la stessa per tutte le stagioni, ovvero  $215^{\circ}$ - $235^{\circ}$ . In autunno, e soprattutto in estate, lo spettro delle direzioni di provenienza risulta piuttosto ridotto rispetto a quanto accade in primavera ed inverno, in cui gli stati di mare con direzione inferiore a  $180^{\circ}$  assumono maggiore rilievo. Per quanto riguarda le altezze d'onda, come prevedibile, i valori maggiori si presentano in inverno, con i minimi assoluti in estate; le mareggiate di maggiore intensità ( $>2$  m) compaiono con una frequenza paragonabile sia in autunno che in inverno, con una presenza apprezzabile anche nei mesi primaverili, mentre risultano quasi del tutto assenti nel periodo estivo. La stessa operazione è stata effettuata sui dati relativi all'ondametro di ENEL della centrale di Torrevaldaliga.

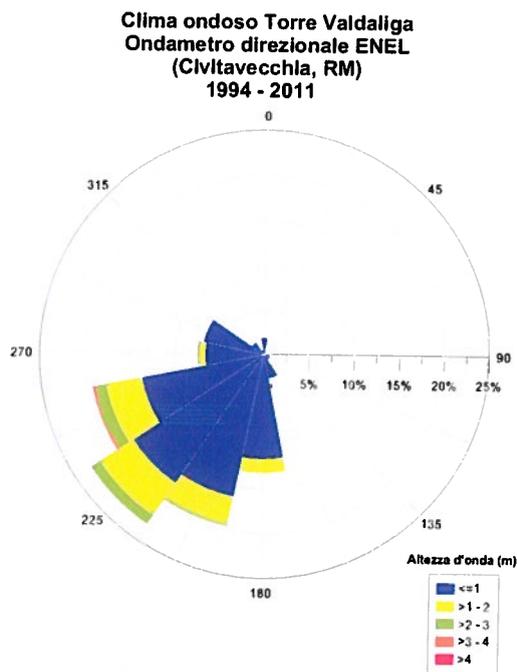


Fig. 26 : Clima d'onda registrato dalla boa ondometrica di Torrevaldaliga (ENEL) tra il 1994 e il 2011.

Dall'analisi del clima ondometrico rilevato dalla boa di Torrevaldaliga (Fig. 26) emerge come la direzione che ha una maggiore frequenza sia associata alla direzione di Libeccio mentre gli eventi del IV quadrante hanno una frequenza ed una intensità molto minore rispetto a quelli del III quadrante.

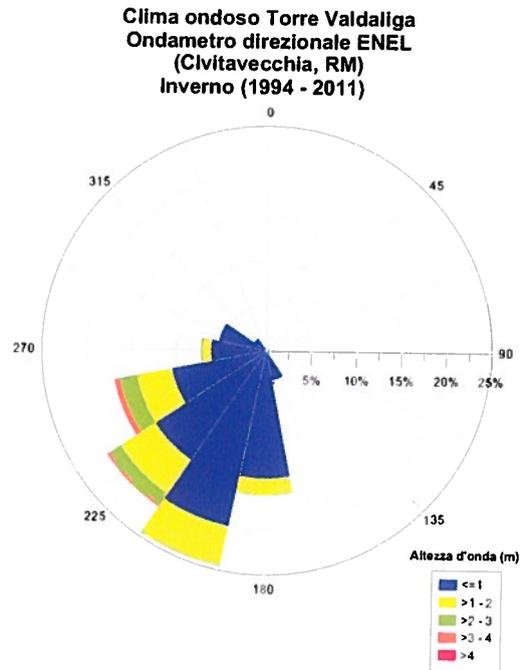


Fig. 27 : Clima d'onda registrato dalla boa ondometrica di Torrevaldaliga (ENEL) tra il 1994 e il 2011 (periodo invernale).

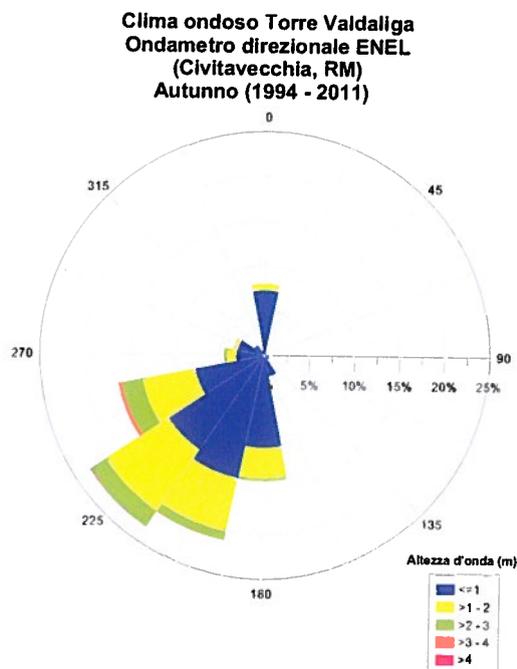


Fig. 28 : Clima d'onda registrato dalla boa ondometrica di Torrevaldaliga (ENEL) tra il 1994 e il 2011 (periodo autunnale).

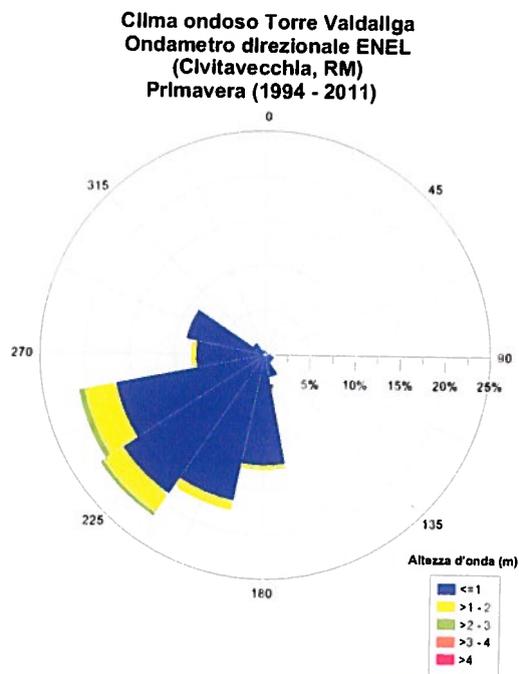


Fig. 29 :Clima d'onda registrato dalla boa ondametrica di Torrevaldaliga (ENEL) tra il 1994 e il 2011 (periodo primaverile).

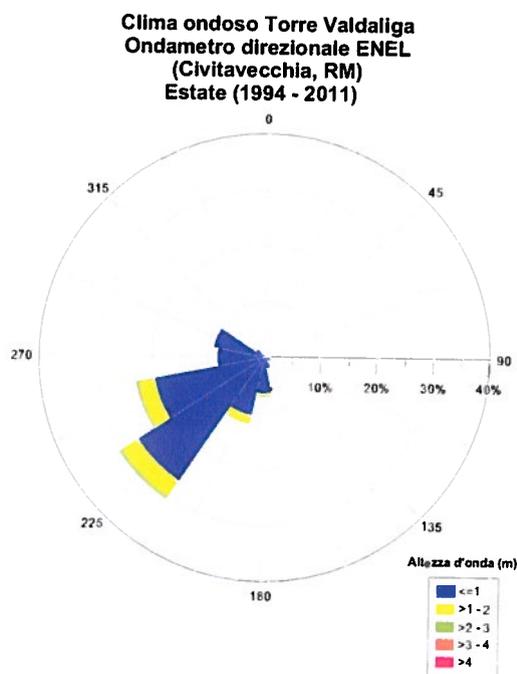


Fig. 30 : Clima d'onda registrato dalla boa ondametrica di Torrevaldaliga (ENEL) tra il 1994 e il 2011 (periodo estivo).

L'analisi stagionale (Fig. 27, Fig. 28, Fig. 29 e Fig 30) mette invece in evidenza che il periodo invernale e quello autunnale registrano le mareggiate più intense provenienti da 247 °N mentre quelli regnati sono relativi alla direzione di Libeccio. Gli eventi relativi al IV quadrante si verificano con maggior frequenza in primavera ed in inverno mentre nel periodo estivo le altezze d'onda non superano i 2 m.

I due datasets non comprendono le rilevazioni relative all'autunno del 2012 in cui, come si può vedere dalle figure 31 e 32, estratte dal sito [www.telemisura.it](http://www.telemisura.it), l'ondametro di Capo Linaro ha registrato un'altezza d'onda significativa pari a 7.8 m proveniente da Libeccio (225 °N) che risulta essere la più elevata tra quelle misurate dalla boa ondometrica stessa e da quella di Torre Valdaliga.

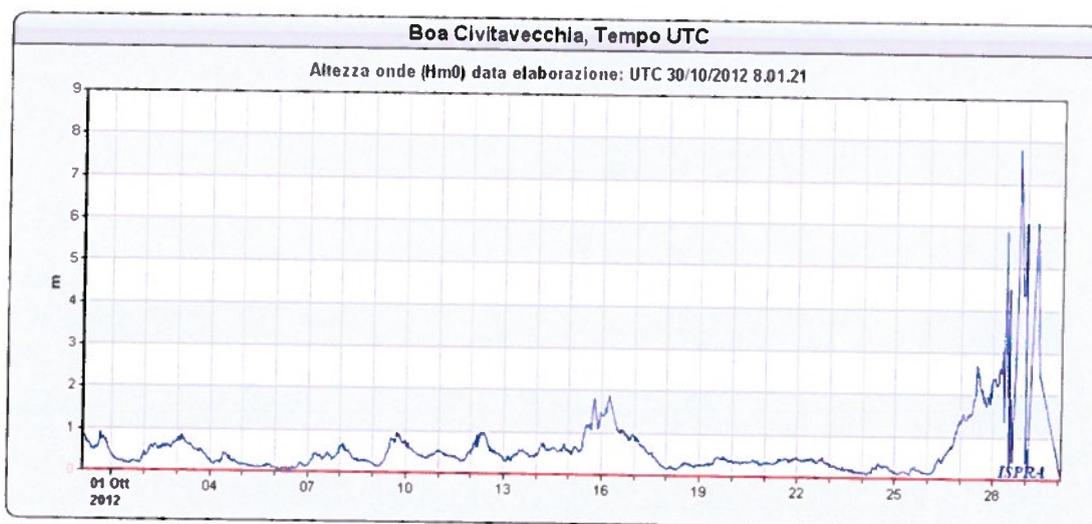


Fig.31 : Variazione nel tempo di Hs relativo al mese di Ottobre 2012  
misurata dalla boa di Capo Linaro.

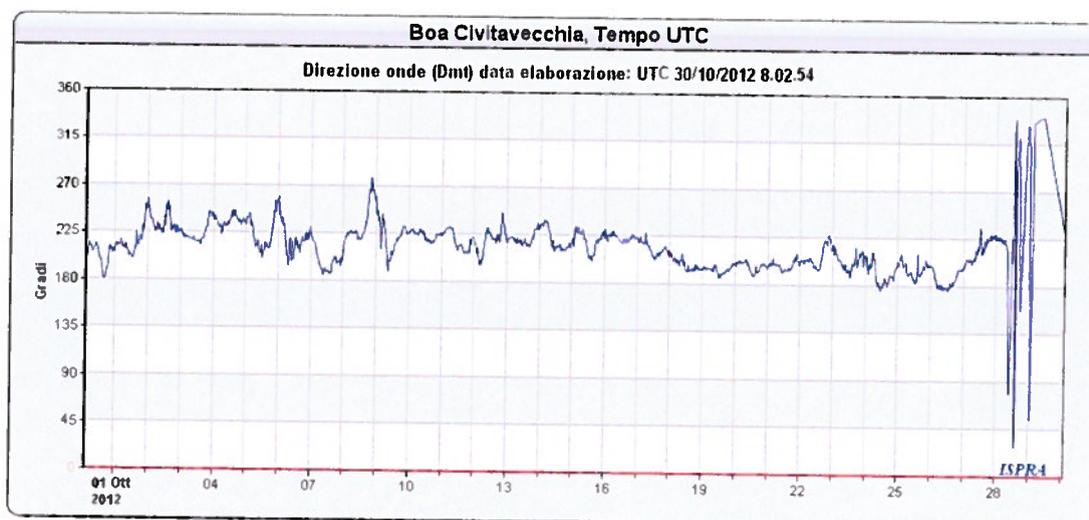


Fig.32 : Variazione nel tempo della direzione dell'onda relativo al mese di Ottobre 2012 misurata dalla boa di Capo Linaro.

### 3.3. Descrizione della corrente generale

La circolazione generale dell'area di studio è caratterizzata da correnti dirette verso Nord-Ovest con velocità comprese tra 0.01 e 0.05 m/s. Tale dato è stato riscontrato sia nelle carte delle correnti marine redatte dall'Istituto Idrografico Militare (I.I.M.) sia dal modello tridimensionale OPA (Ocean PARallelise) del Mar Mediterraneo.

I dati di circolazione generale, che sono stati ottenuti da misure eseguite nel Mediterraneo, sono stati acquisiti dall'I.I.M e risalgono al 1982. Da tali misure sono state redatte le carte mensili le quali sono state utilizzate a lungo per lo studio della circolazione nel Mediterraneo. A partire dal 2000 i dati di corrente di circolazione generale sono stati ricavati mediante modelli matematici tridimensionali come il modello oceanografico OPA messo a punto dall'INGV di Bologna a diverse scale spaziali nei principali bacini del Mar Mediterraneo (Pinardi et al, 2004). Per lo svolgimento del presente lavoro si è fatto riferimento ai dati forniti da questo modello..

Si consideri comunque che c'è una evidente congruenza tra le carte rappresentate dall'I.I.M (Fig. 33) e i risultati generali del modello di circolazione OPA (Fig. 34), ovvero è verificata la condizione che, indipendentemente dalle stagioni, lungo lo shelf continentale laziale la corrente ha sempre la direzione Nord-Ovest.

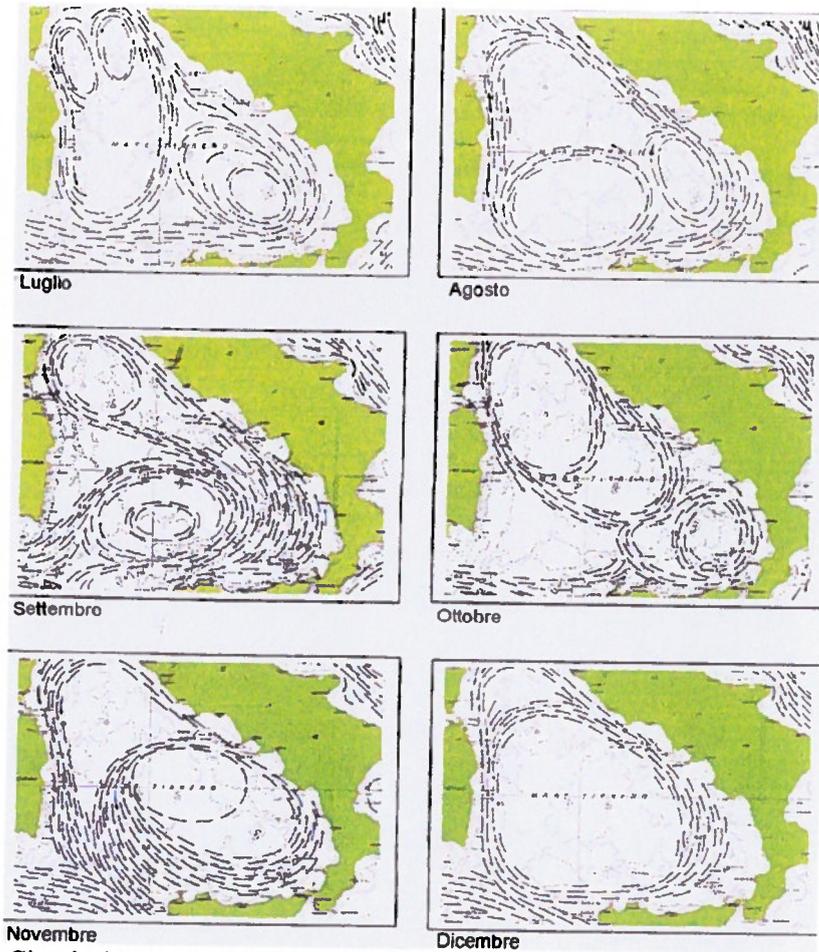


Fig. 33: Circolazione superficiale del Tirreno Centrale nei diversi mesi dell'anno (IIM, 1982).

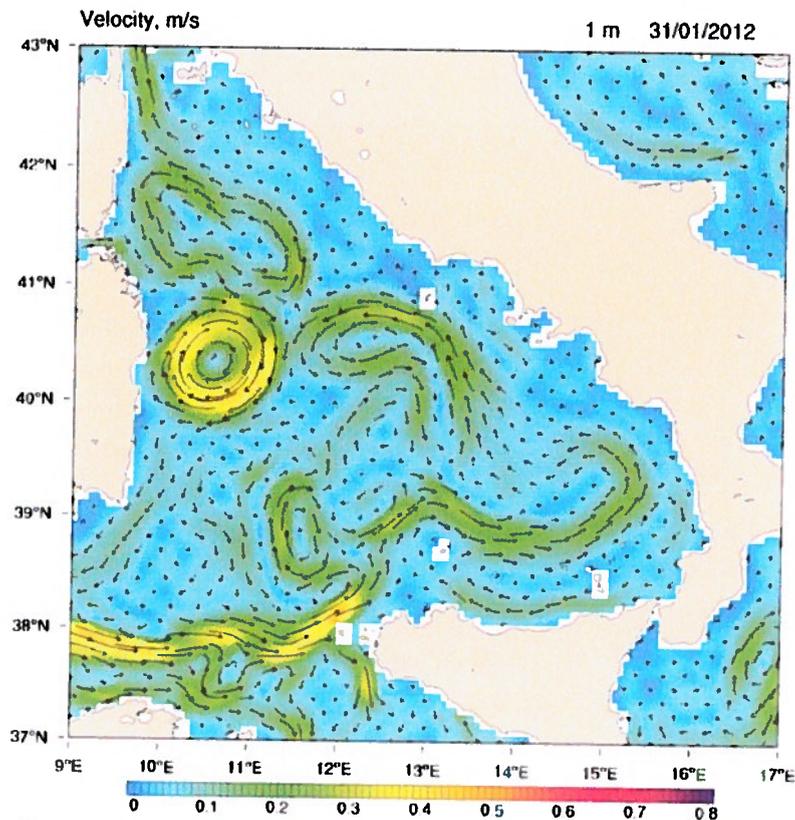


Fig. 34 :Circolazione generale relativa allo strato superficiale nel Mar Tirreno calcolata dal modello OPA.

## 4. Materiali e metodi

### 4.1. Analisi degli eventi estremi

Per la determinazione dei tempi di ritorno degli eventi estremi è necessario eseguire un'elaborazione statistica delle altezze d'onda maggiori relative alla serie storica di riferimento desunta dalle registrazioni ondametriche. Mediante regolarizzazione della serie di eventi estremi, secondo note funzioni probabilistiche, è possibile ricavare le caratteristiche del moto ondoso (definite in termini di altezza significativa e periodo) da associare ad assegnati tempi di ritorno (o probabilità di occorrenza).

Nel caso di serie di dati relativi a misure di altezza d'onda è più affidabile l'analisi statistica di



serie tronche, ottenute selezionando per i diversi settori direzionali di caratteristiche omogenee tutte le altezze d'onda significative, registrate al picco di mareggiate indipendenti superiori ad una soglia prefissata. Infatti, il metodo delle serie tronche è da preferire sia al metodo dei massimi annuali (dati in numero limitato e per alcune "annate" ben poco estremi) sia a quello dell'analisi di tutta la serie di eventi di moto ondoso (sicuramente non indipendenti e poco omogenei). La scelta della soglia di troncamento deve essere effettuata al fine di garantire comunque una selezione di un numero di eventi estremi comparabile con il numero di anni di osservazione e deve essere tale da separare le mareggiate ordinarie da quelle estreme.

Nel caso in esame per la determinazione dell'onda di progetto sono stati analizzate le mareggiate più intense registrate dall'ondametro di Torre Valdaliga e da quello di Capo Linaro in modo da ottenere la più lunga serie disponibile che si estende dal 1994 al 2012.

Successivamente distinte le serie "tronche" di dati sono state riferite alle usuali leggi di distribuzione probabilistica, al fine di determinare il valore dell'altezza d'onda associato ad un prefissato tempo di ritorno, o la probabilità di non superamento.

Le leggi di distribuzione di probabilità cumulate di non superamento sono quella di Weibull (1) e quella di Gumbel (2), che vengono suggerite dall'AIPCN (Report of Working Group n.12, supplement to Bulletin 78/79-1992).

$$P(X < x) = 1 - e^{-[(x-B)/A]^{\alpha}} \quad (1)$$

$$P(X < x) = \exp[-\exp[-(x-b)/a]] \quad (2)$$

dove  $X$  è la variabile aleatoria,  $x$  è il valore di non superamento e  $\alpha$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $a$ ,  $b$  sono i parametri delle distribuzioni. Tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell'evento dalla relazione (3):

$$Tr(X < x) = 1/(1 - P(X < x)) \quad (3)$$



## 4.2. Descrizione del modello STWAVE

Per simulare la propagazione del moto ondoso lungo il tratto di costa compreso tra Punta del Pecoraro e Capo Linaro è stato utilizzato il modello STWAVE.

L' STWAVE (STeady-state spectral WAVE model) è un modello alle differenze finite che risolve l'equazione di bilancio dell'azione dell'onda. Lo scopo della sua applicazione in regioni costiere è quello di descrivere quantitativamente i cambiamenti dei parametri dell'onda (come l'altezza, il periodo, la direzione e la deformazione dello spettro) tra la zona offshore e quella nearshore. Infatti, in acque profonde il campo d'onda è relativamente omogeneo, mentre in prossimità della costa, dove le onde sono fortemente influenzate dalle variazioni di batimetria e dalle correnti, i parametri d'onda possono variare significativamente sulla scala di decine di metri. La caratterizzazione dell'onda nearshore è di fondamentale importanza per dimensionare le opere di ingegneria costiera e per calcolare le correnti litoranee dalle quali si determina il trasporto sedimentario e il relativo cambiamento morfologico del fondale.

L' STWAVE simula i fenomeni di rifrazione e shoaling indotte dalla profondità, di diffrazione e riflessione causata da ostacoli naturali (coste alte) o artificiali (pennelli o antemurali di porti); calcola i parametri d' onda, come l'altezza, il periodo e la direzione, la zona del dominio dove l'onda frange e il radiation stress. Tiene conto inoltre dell'interazione corrente-onda e vento-onda.

### 4.2.1. Le equazioni del modello

L' equazione fondamentale che risolve l' STWAVE (Smith et al, 2001) è la relazione di dispersione dell'onda. L'approccio alla sua formulazione segue dalla descrizione delle variabili su due diversi sistemi di riferimento: quello in movimento con le correnti dove le variabili hanno il pedice r, e quello relativo alla Terra (sistema assoluto) dove le variabili hanno il pedice a.

La relazione di dispersione per un sistema in movimento è data da (Jonsson 1990) :

$$\omega_r^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d) \quad (4)$$

In un sistema di riferimento assoluto, l'equazione di dispersione è calcolata mediante:



$$\omega_a = \omega_r + k \cdot U \cdot \cos(\delta - \alpha) \quad (5)$$

Il numero d'onda viene calcolato sostituendo l'equazione (4) nell'equazione (5).

Le soluzioni per la rifrazione e lo shoaling richiedono sia la celerità della singola onda,  $C$ , sia la celerità di gruppo,  $C_g$ . Nel sistema di riferimento relativo alla corrente si ha :

$$C_r = \frac{\omega_r}{k} \quad (6)$$

$$C_{gr} = 0.5 \cdot C_r \left( 1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \quad (7)$$

La direzione di entrambe le celerità è  $\alpha$ , ovvero la direzione ortogonale al fronte d'onda. Nel sistema di riferimento assoluto le espressioni delle velocità dell'onda sono date da :

$$C_a = C_r + U \cdot \cos(\delta - \alpha) \quad (8)$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i \quad (9)$$

dove il pedice  $i$  indica la notazione tensoriale per le componenti nella direzione  $x$  e  $y$ . In questo caso la direzione con cui si propaga la velocità dell'onda singola è perpendicolare al fronte d'onda, mentre la celerità di gruppo definisce il cosiddetto raggio dell'onda. La direzione di quest'ultimo è definita dalla seguente formula:

$$\mu = \tan^{-1} \left( \frac{C_{gr} \cdot \sin(\alpha) + U \cdot \sin(\delta)}{C_{gr} \cdot \cos(\alpha) + U \cdot \cos(\delta)} \right) \quad (10)$$

Si ha quindi che, in presenza di corrente, l'energia dell'onda si muove lungo il suo raggio mentre la direzione effettiva è quella perpendicolare alla sua cresta.

I fenomeni di rifrazione e di shoaling sono implementati nel modello STWAVE applicando l'equazione di conservazione dell'onda che è definita nelle due direzioni sopracitate. Se si considera la propagazione perpendicolare al fronte d'onda (assenza di corrente) si ha :

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = - \frac{C_r \cdot k}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \cdot \frac{Dd}{Dn} \cdot \frac{k_i}{k} \cdot \frac{DU_i}{Dn} \quad (11)$$

mentre se si tiene conto della direzione lungo il raggio d'onda (interazione onda-corrente) si ottiene

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a \cdot C_{ga} \cdot \cos(\mu \cdot \alpha) \cdot E(\omega_a, \alpha)}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r} \quad (12)$$



Il fenomeno di diffrazione viene incluso nel modello attraverso lo smoothing dell'energia dello spettro d'onda in una specifica banda di direzione e frequenza. Il risultato è la seguente espressione:

$$E_j(\omega_a, \alpha) = 0.55 \cdot E_j(\omega_a, \alpha) + 0.255 \cdot [E_{j+1}(\omega_a, \alpha) + E_{j-1}(\omega_a, \alpha)] \quad (13)$$

Il frangimento dell'onda è stato implementato all'interno di STWAVE dalla seguente formula empirica :

$$H_{m0_{max}} = 0.1 \cdot L \cdot \tanh(k \cdot d) \quad (14)$$

I gradienti del radiation stress sono calcolati nel modello per fornire le forzanti al campo idrodinamico sotto forma di correnti nearshore e di cambiamenti del livello dell'acqua (wave setup e setdown). Le correnti indotte dalle onde sono infatti le principali artefici del trasporto sedimentario all'interno della surf zone.

I tensori del radiation stress sono calcolati sulla base della teoria lineare dell'onda :

$$S_{xx} = \rho_w \cdot g \cdot \iint E(f, \alpha) \cdot \left[ 0.5 \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \cdot (\cos^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha \quad (15)$$

$$S_{xy} = \rho_w \cdot g \cdot \iint \frac{E(f, \alpha)}{2} \cdot \left[ 0.5 \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \right] df d\alpha \quad (16)$$

$$S_{yy} = \rho_w \cdot g \cdot \iint E(f, \alpha) \cdot \left[ 0.5 \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \cdot (\sin^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha \quad (17)$$

I relativi gradienti hanno quindi la seguente forma :

$$\tau_x = - \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (18)$$

$$\tau_y = - \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad (19)$$

#### 4.2.2. Forzanti e condizioni al contorno

Il dominio del modello STWAVE comprende un piccolo tratto di costa, lungo circa 5 km, posto tra Punta del Pecoraro a nord e Capo Linaro a sud. Uno degli obiettivi di questo lavoro è quello di evidenziare l'influenza delle onde che hanno un lungo tempo di ritorno (2, 10 e 20 anni) lungo litorale oggetto di studio.

Il dominio ha una forma rettangolare ed è delimitato a ovest dalla batimetrica dei -60 m che, da dati relativi ai periodi di picco (da cui si può calcolare la lunghezza d'onda) misurati per la suddetta area, risulta essere maggiore rispetto alla profondità dove avviene la deformazione delle onde.

La griglia di calcolo (Fig. 35) ha una elevatissima risoluzione in quanto è formata da elementi quadrati con un lato di 10 m tale da rappresentare la linea di costa e la morfologia subacquea in maniera adeguata.



Fig.35: Griglia di calcolo del modello di moto ondoso STWAVE.

Sul lato ovest del dominio viene definita l'onda incidente sotto forma di spettro d'energia bidimensionale. Quest'ultimo descrive, infatti, la distribuzione dell'energia d'onda in funzione della



Laboratorio di Oceanologia Sperimentale  
ed Ecologia Marina (DEB)  
Università della Tuscia  
REL-99.0-MOD-1212-APC



frequenza e della direzione. Lo spettro d'onda incidente può essere specificato all'interno del modello utilizzando un algoritmo che, dati alcuni valori in ingresso, ricostruisce una forma parametrica spettrale. Nel nostro caso è stato utilizzato il metodo TMA (shallow water) che è capace di ricostruire uno spettro incidente dai seguenti parametri: periodo di picco dell'onda ( $T_p$ ), altezza d'onda, angolo che determina la direzione dello spettro e due altri parametri ( $\gamma$  e  $n_n$ ) che sono funzione del periodo di picco.

Gli altri due lati, a Nord e a Sud del dominio, hanno la condizione di 1D trasformed spectrum.

## **5. Risultati**

### **5.1. Risultati della statistica degli eventi estremi**

I dati utilizzati per il calcolo del tempo di ritorno degli eventi estremi fanno riferimento all'ondametro della Rete Ondametrica Nazionale (RON) posto a largo di Capo Linaro e ai dati relativi alla boa dell'ENEL di Torrevaldaliga.

In particolare le registrazioni relative a quest'ultimo ondametro sono state trasposte geograficamente sul punto dove è posizionata la boa di Capo Linaro secondo la metodologia riportata in "Regime moto ondoso lungo il litorale laziale" (P. Contini e P. De Girolamo).

In questo modo è possibile ottenere un unico dataset (Fig. 36) che comprende circa 13 anni di rilevazioni utili per effettuare una significativa analisi statistica degli eventi estremi.

**Clima ondoso a Capo Linaro**  
**Ondametro direzionale RON + Dati ENEL trasposti**  
**(Civitavecchia, RM)**  
**1994 - 2012**

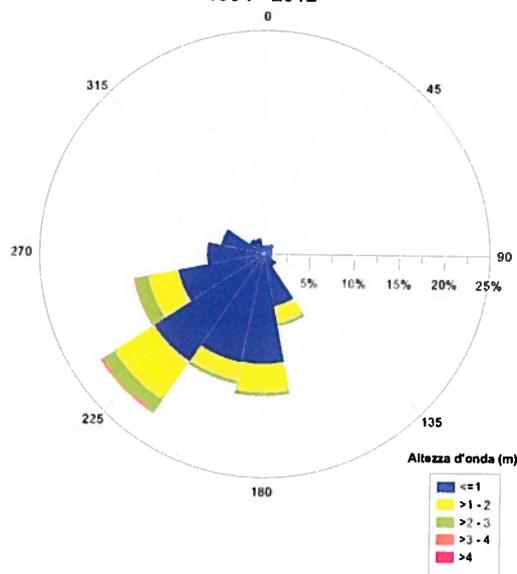


Fig. 36 :Clima d'onda relativo all'unico dataset di cui fanno parte i dati di Capo Linaro (RON) e quelli di Torrevaldaliga (ENEL) dopo il processo di trasposizione.

L'analisi è stata condotta attraverso i seguenti steps:

- suddividere il dataset in settori di provenienza;
- selezionare le altezze d'onda significative da sottoporre all'analisi statistica;
- scegliere la distribuzione di probabilità che si adatta meglio alla distribuzione sperimentale dei dati;
- calcolare il tempo di ritorno.

I settori di provenienza sono stati scelti in funzione del settore di traversia della zona di Capo Linaro e alla frequenza e intensità delle mareggiate.

In particolare gli intervalli angolari presi in considerazione sono stati: 157 °- 202 °N, 202 °- 270 °N, 270 °- 360 °N.

Per la selezione degli eventi da sottoporre all'analisi statistica è stato utilizzato il metodo POT (Peak Over Threshold).

I valori soglia attribuiti ai diversi settori direzionali scelti sono: 3 m per il settore angolare compreso tra 157 °N e 202 °N, 3.3 m per la direzione compresa tra 202 °N e 270 °N, 1.10 m per la direzione da 270 °N a 360 °N.

Al fine di testare il metodo seguito per il calcolo del tempo di ritorno, di seguito vengono riportate le rette di regressione (Fig. 37, Fig. 38, Fig. 39, Fig. 40 e Fig. 41) relative alle diverse distribuzioni di probabilità per il settore direzionale compreso tra 202-270 °N.

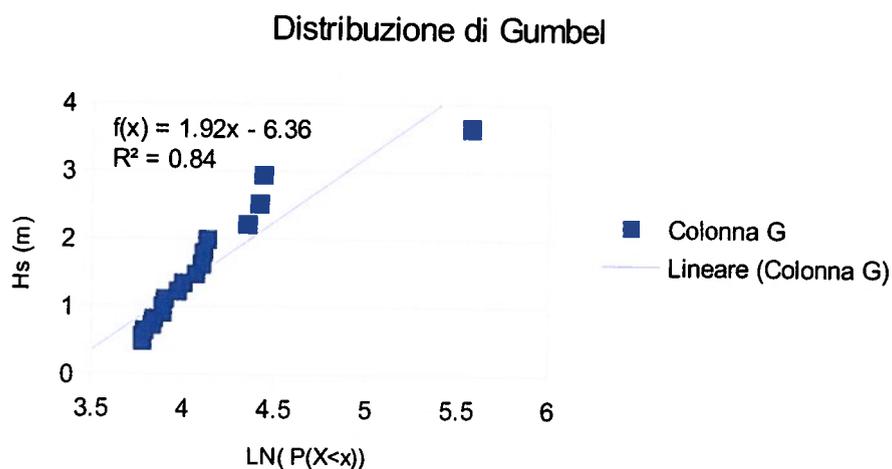


Fig 37: Retta di regressione relativa alla distribuzione di Gumbel.

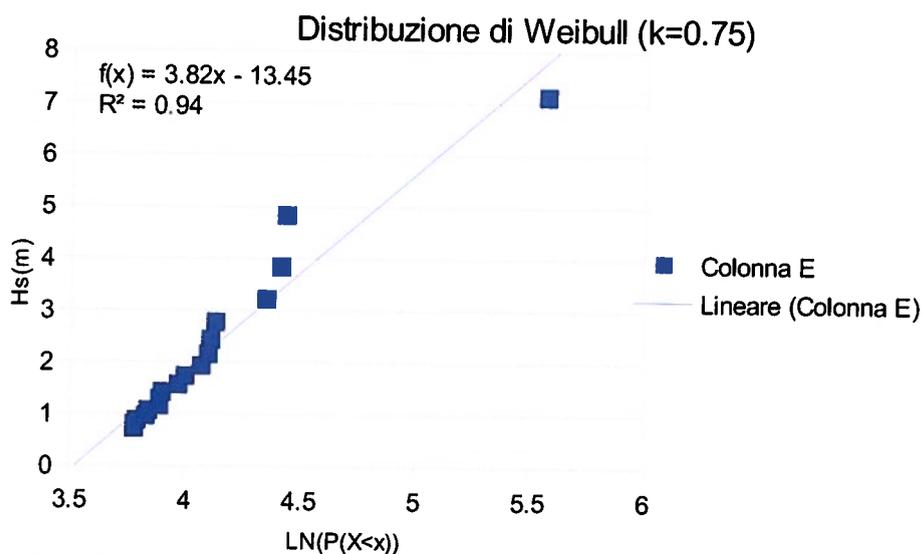


Fig.38. Retta di regressione relativa alla distribuzione di Weibull con k=0.75

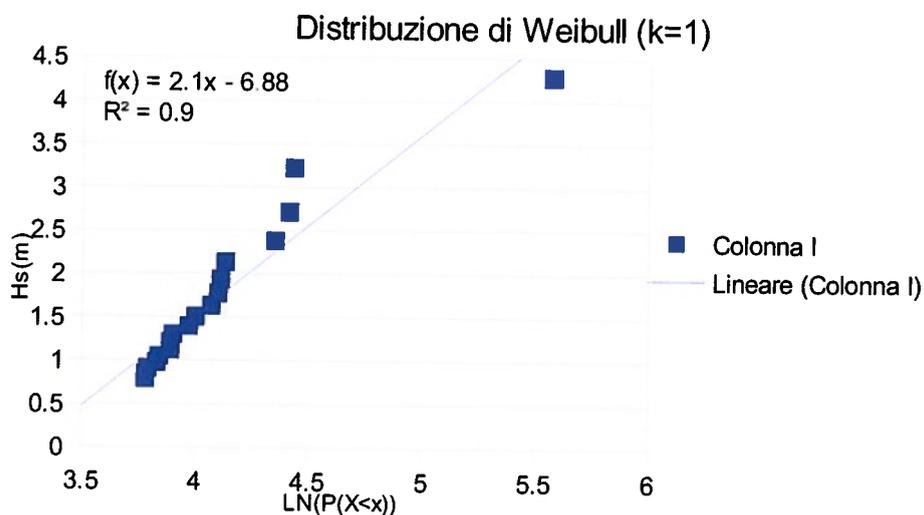


Fig.39 : Retta di regressione relativa alla distribuzione di Weibull con k=1

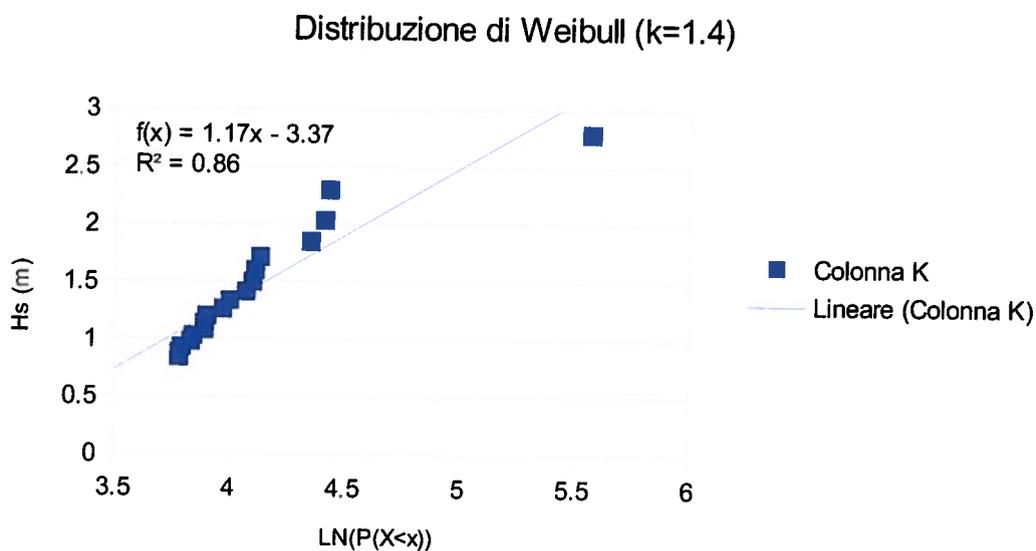


Fig. 40 : Retta di regressione relativa alla distribuzione di Weibull con k=1.4

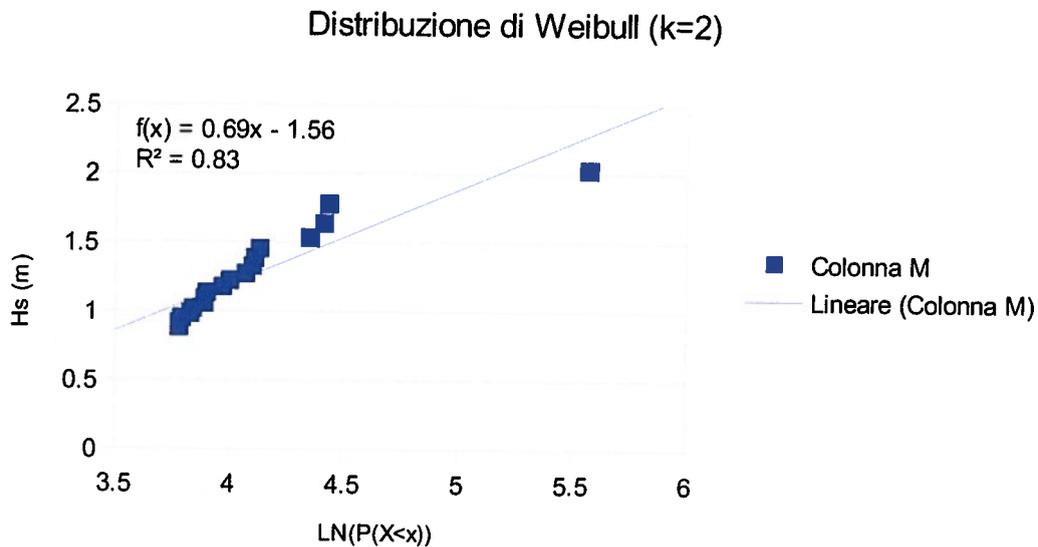


Fig. 41 : Retta di regressione relativa alla distribuzione di Weibull con k=2.

Dall'analisi del valore del coefficiente di correlazione appare che la distribuzione che meglio si adatta al dataset è la distribuzione di Weibull con coefficiente di 0.75.

Lo stesso metodo è stato applicato per gli altri settori direzionali ottenendo i seguenti risultati relativi al tempo di ritorno e alla probabilità di non superamento (Tab. 2).

Tempo di ritorno (anni)	152 °-202 °		202 °-270 °		270 °- 360 °	
	Hs	P(X<x)	Hs	P(X<x)	Hs	P(X<x)
2	4.17	0.84	4.17	0.84	1.5	0.55
5	5	0.90	5	0.90	2	0.81
10	5.65	0.93	5.65	0.93	2.5	0.90
20	6.28	0.95	6.28	0.95	3.2	0.95

Tab.2 : Tempo di ritorno in funzione della classe direzionale e dell'altezza d'onda



## 5.2. Risultati delle simulazioni numeriche

Sulla base delle analisi degli eventi estremi sono state effettuate delle simulazioni con il modello numerico STWAVE per descrivere la propagazione dell'onda verso riva e analizzare l'effetto che producono i processi di rifrazione, shoaling e frangimento sulla dinamica costiera. Nella tabella 3 vengono riportati gli scenari simulati con il loro relativo tempo di ritorno.

Id simulazione	Hs (m)	Dir (°N)	Tempo di ritorno (anni)
1	4.17	224	2
2	5	224	5
3	5.65	224	10
4	6.28	224	20
5	4.17	177	2
6	5	177	5
7	5.65	177	10
8	6.28	177	20
9	1.5	315	2
10	2	315	5
11	2.5	315	10
12	3.2	315	20
13	7.8	225	Registrato solo il 30/10/12

Tab.3 : Scenari simulati con il modello numerico STWAVE.

Come si evince dai dati riportati in tabella, la scelta degli scenari è stata effettuata tenendo conto delle direzioni da cui il moto ondoso arriva con maggiore frequenza. Dalle altezze significative e dai relativi tempi di ritorno si può notare come il Mezzogiorno e il Libeccio siano gli eventi che mostrano avere maggiore intensità. Per valutarne l'impatto sulla costa è necessario effettuare delle simulazioni che tengono conto dei processi legati alla propagazione del moto ondoso in acque basse.

Nel presente studio viene inoltre simulato l'evento che si è verificato il 30 Ottobre del 2012 a cui

è associata l'altezza d'onda più elevata che sia stata mai registrata dall'ondametro di Capo Linaro e da quello di Torrevaldaliga.

Per la definizione del periodo d'onda associato a tali scenari è consuetudine fare riferimento a formule che correlano il periodo di picco all'altezza d'onda significativa. La formula utilizzata in questo caso è:

$$T_p = 4.51 * H_s^{0.5} \quad (20)$$

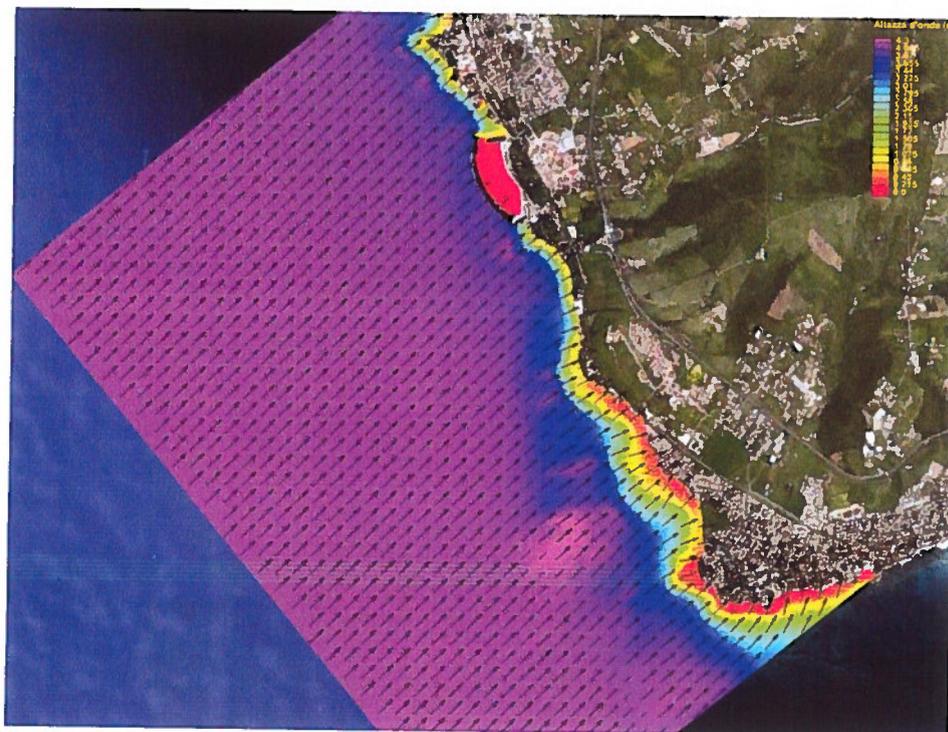


Fig. 42 : Simulazione 1

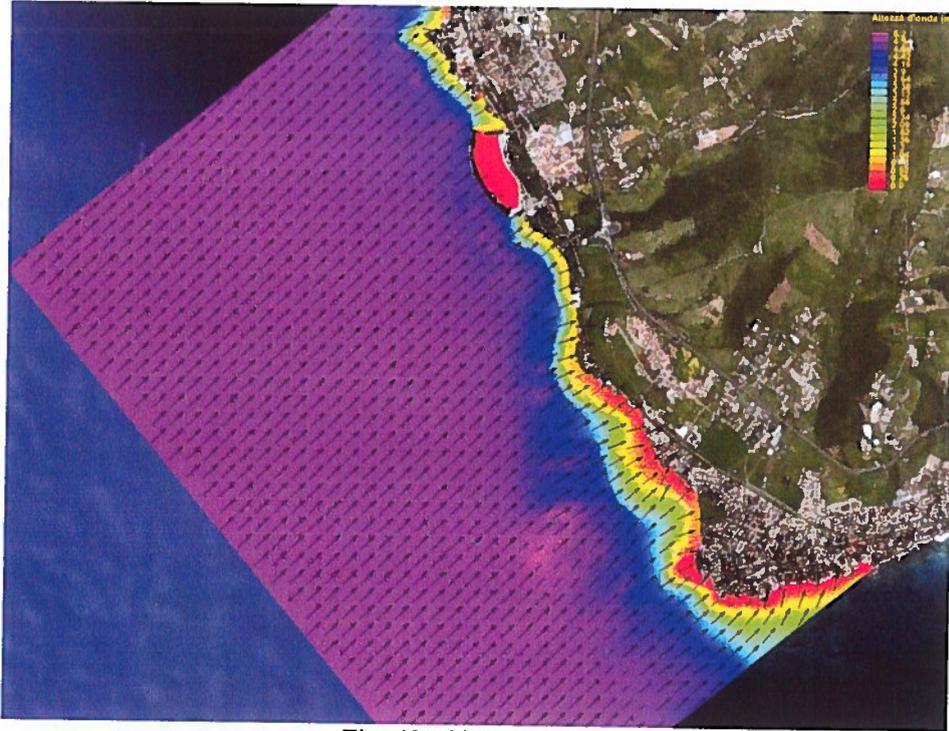


Fig. 43 : Simulazione 2

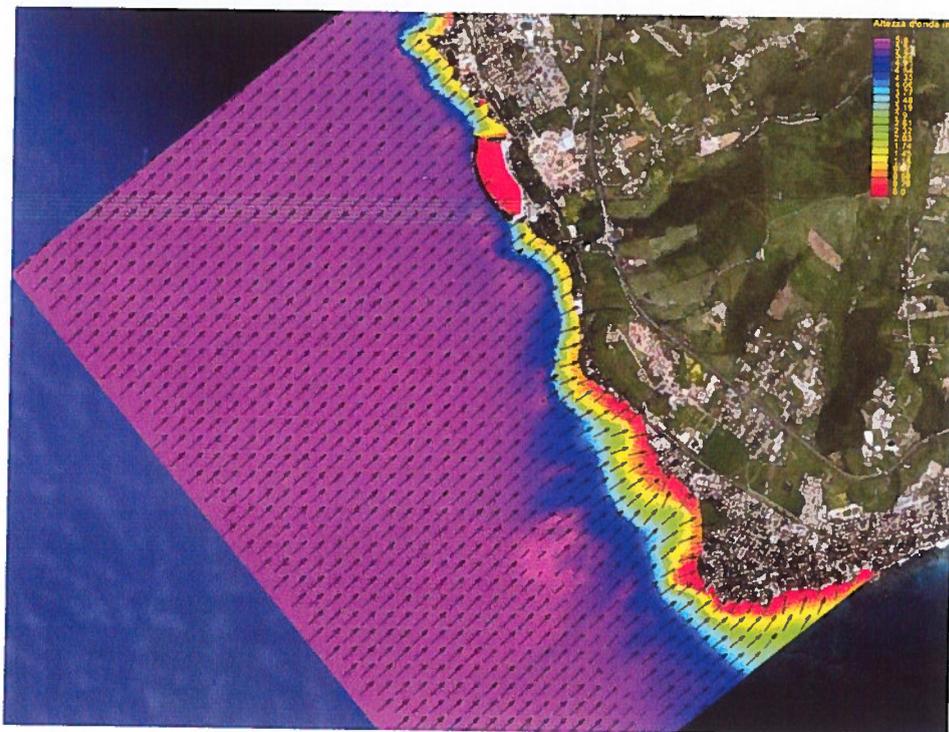


Fig. 44 : Simulazione 3.

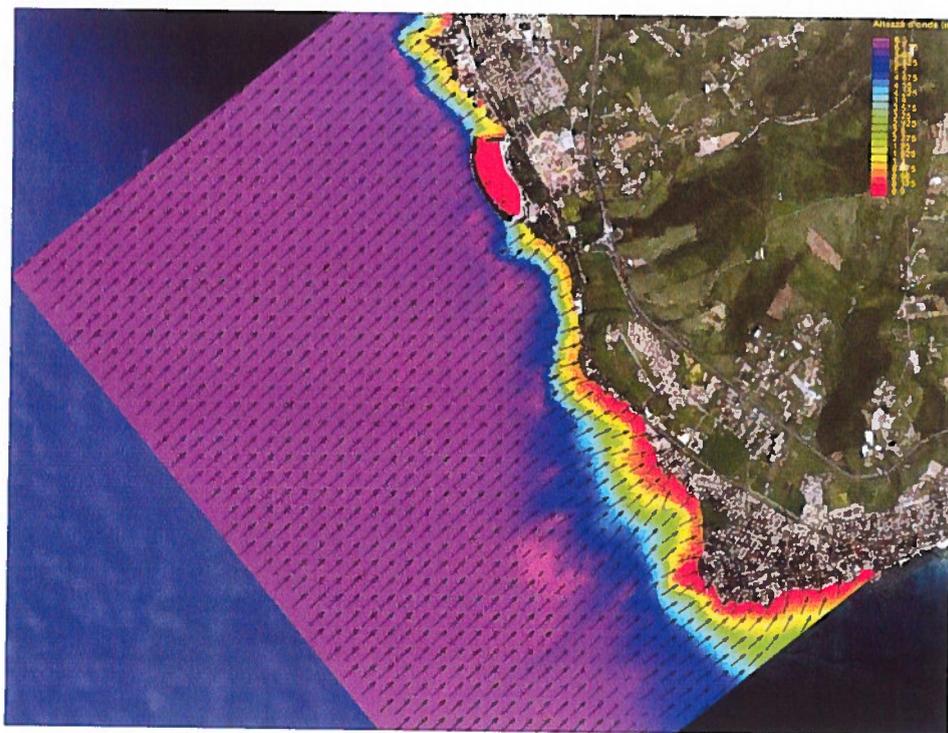


Fig. 45 : Simulazione 4

I quattro scenari relativi agli eventi di Libeccio (Fig.42, Fig.43, Fig.44 e Fig.45) mostrano che la direzione del moto ondoso è perpendicolare rispetto al tratto di costa oggetto di studio. Questo favorisce la formazione di numerose aree in cui l'altezza d'onda aumenta rispetto a quella presente a largo (processo di shoaling) mentre, a causa della morfologia subacquea, si verificano intensi fenomeni di rifrazione in corrispondenza di Capo Linaro e nelle due baie a nord di questo promontorio. In tale zona e in ognuno dei quattro scenari proposti, il frangimento si verifica più a largo favorendo la formazione di correnti di ritorno (rip current) al centro delle baie.

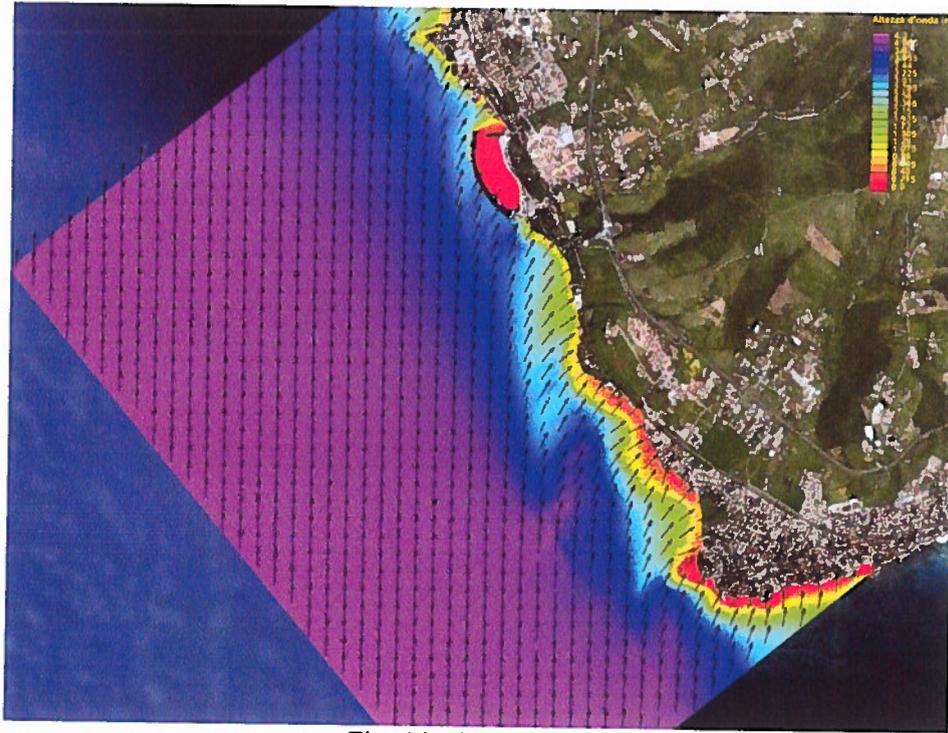


Fig. 46 : Simulazione 5

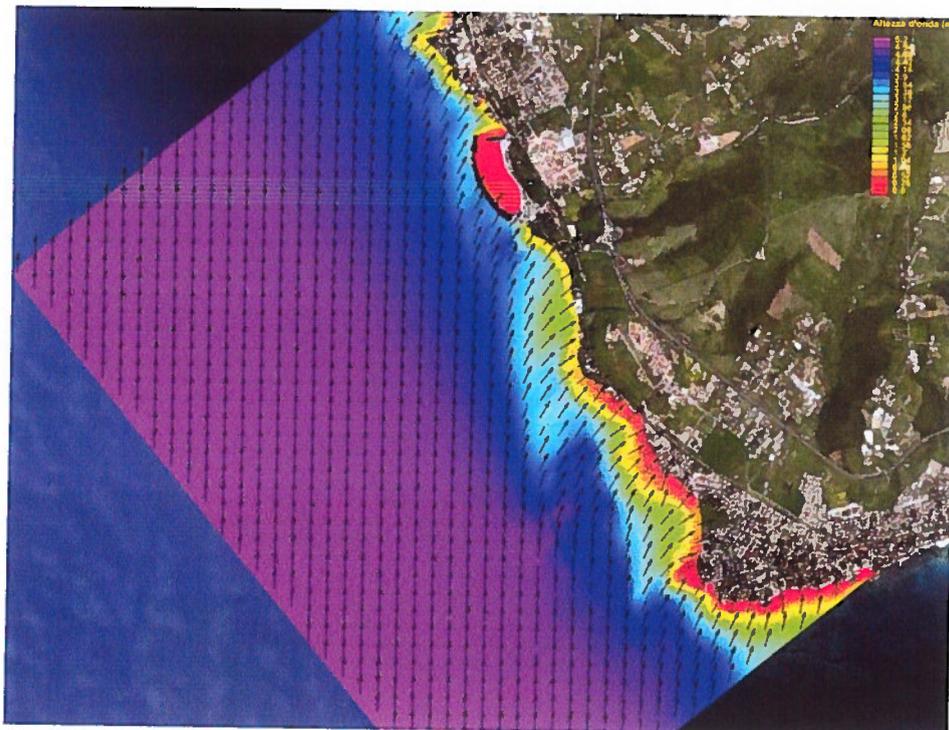


Fig. 47 : Simulazione 6

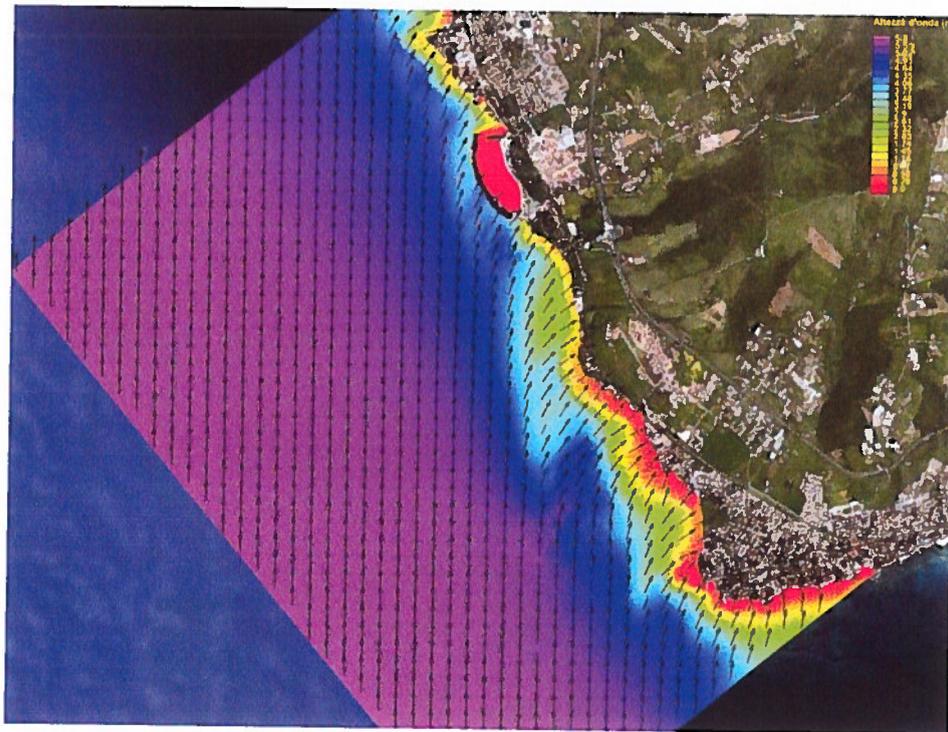


Fig. 48: Simulazione 7

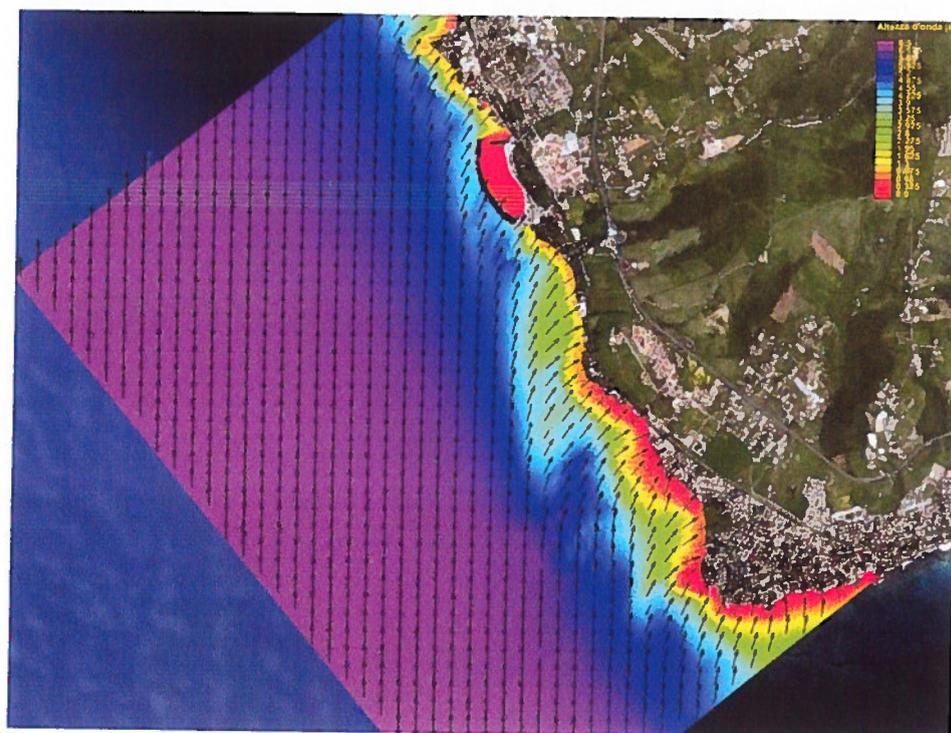


Fig. 49: Simulazione 8

Gli scenari che comprendono gli eventi provenienti da Mezzogiorno (Fig. 46, Fig. 47, Fig. 48 e Fig. 49) hanno una maggiore influenza nella parte nord del tratto costiero oggetto di studio (Riva di Traiano e Capo Linaro); infatti, si può notare come in questa area il frangimento dell'onda avviene a pochi metri dalla linea di riva. A causa della direzione del moto ondoso rispetto all'orientamento della linea di costa, si verificano intensi fenomeni di diffrazione e rifrazione a nord di Capo Linaro.

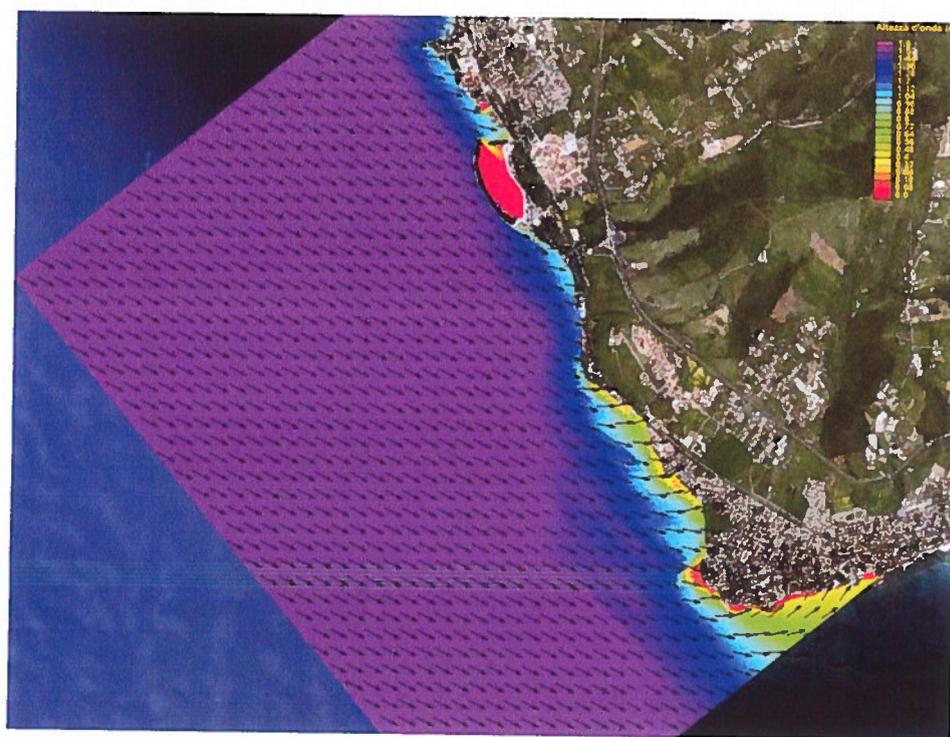


Fig. 50 : Simulazione 9

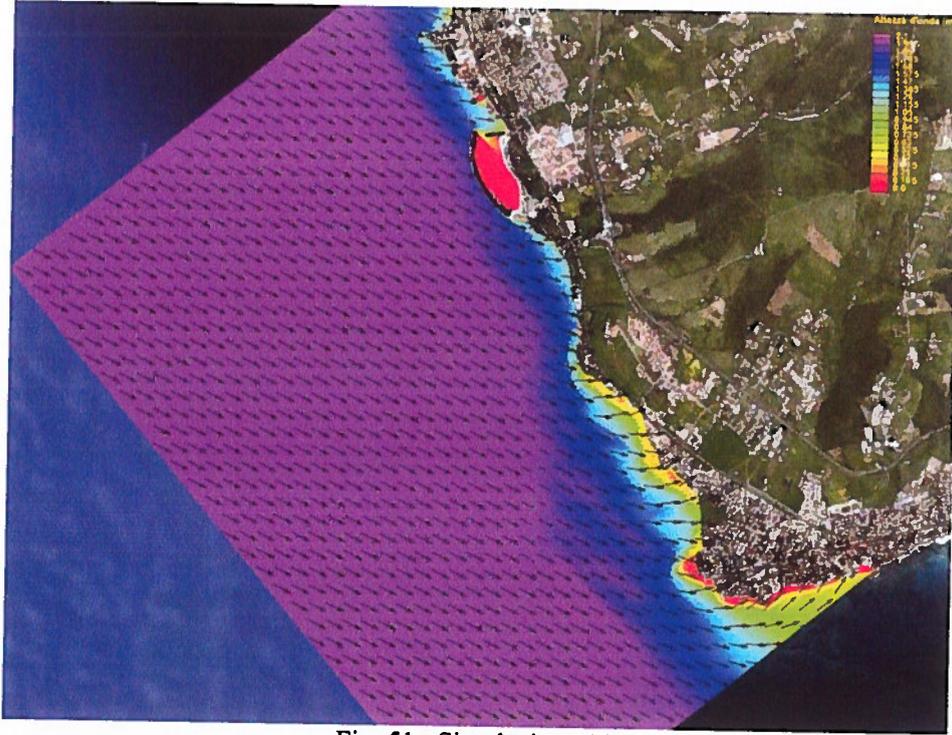


Fig. 51 : Simulazione 10

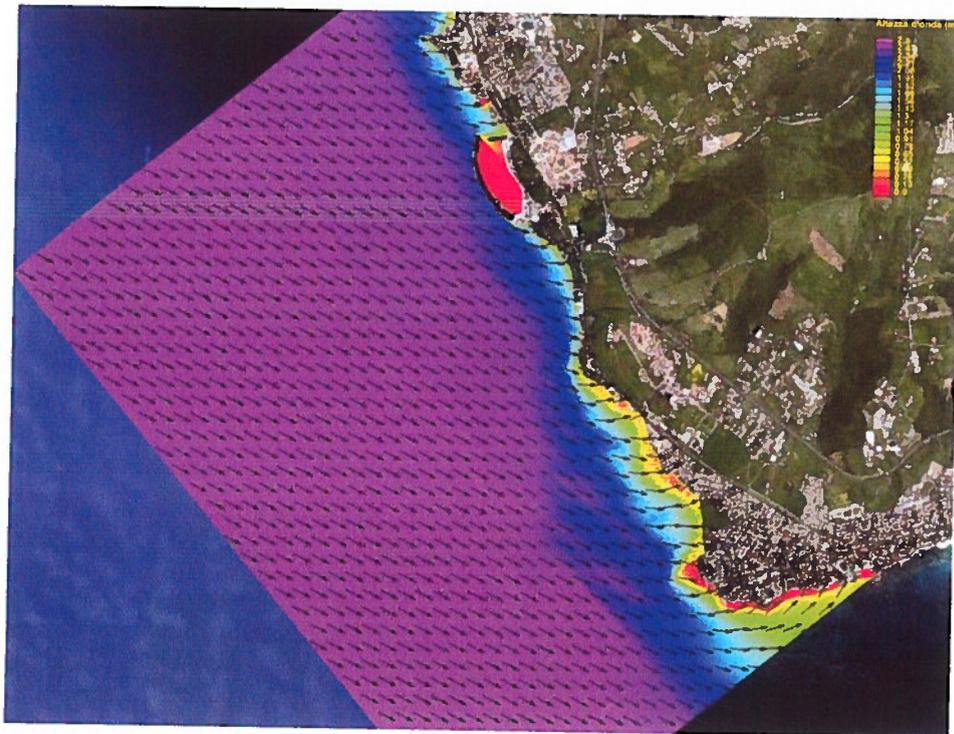


Fig. 52 : Simulazione 11

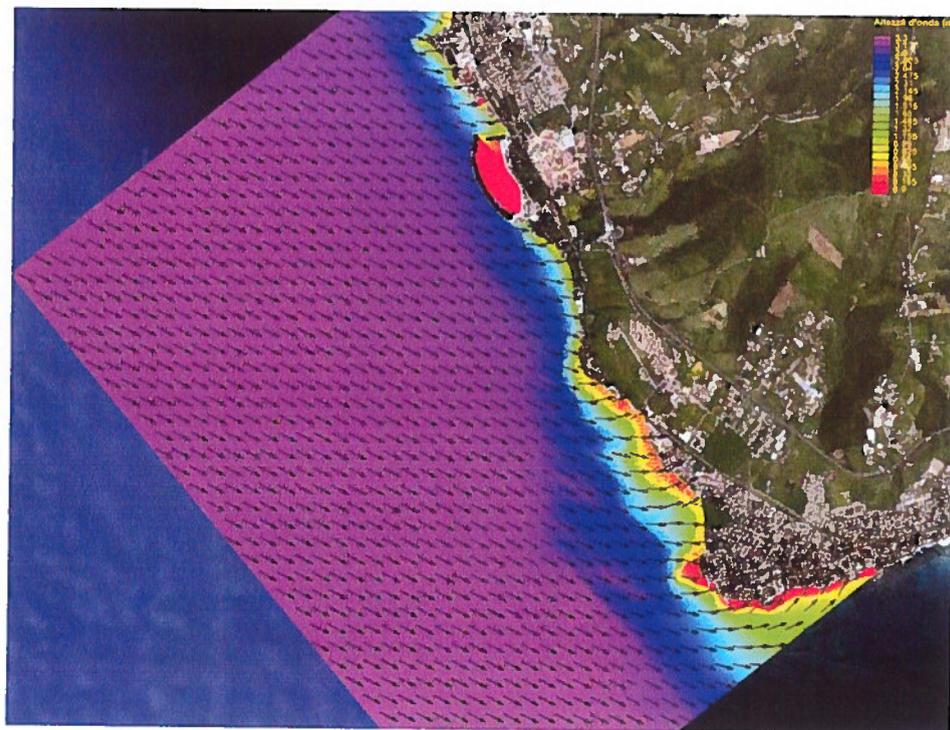


Fig. 53 : Simulazione 12

Anche gli scenari di Maestrale (Fig 50, Fig. 51, Fig. 52 e Fig. 53) colpiscono principalmente il tratto di costa che si estende da Punta del Pecoraro al porto di Riva di Traiano in quanto la zona di frangimento risulta molto ridotta. L'area più a sud risulta più protetta e caratterizzata da fenomeni di rifrazione che creano una piccola area di shoaling posta a nord di Capo Linaro.

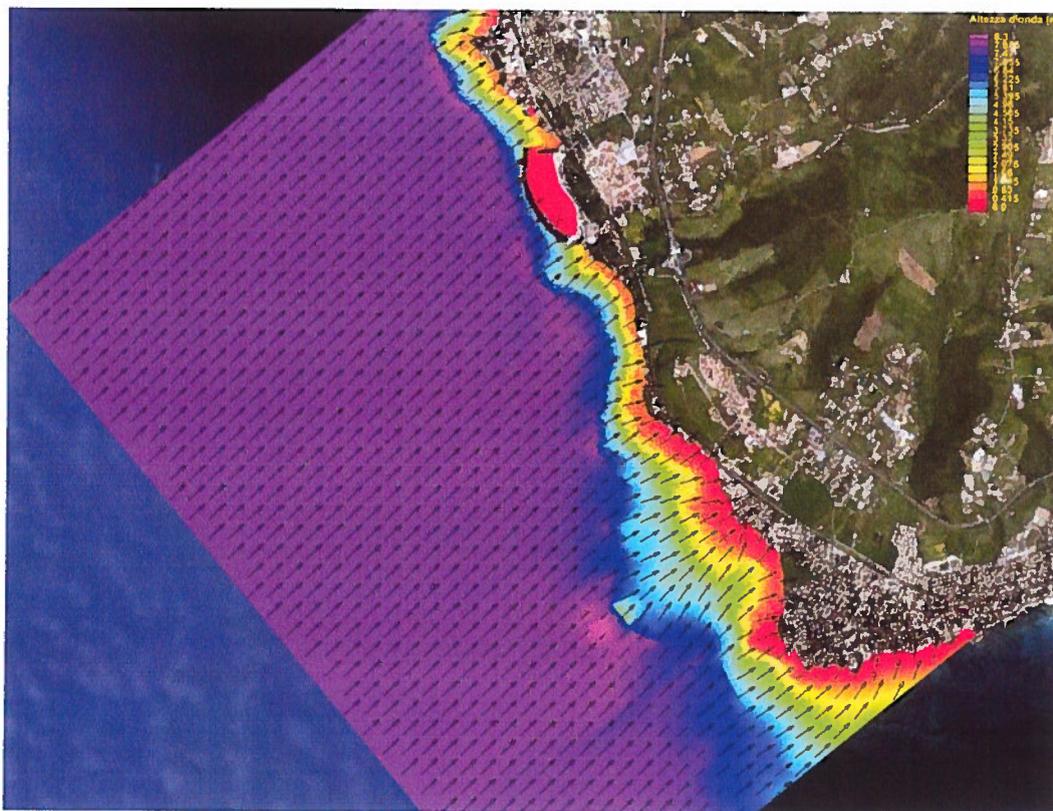


Fig. 54 : Simulazione 13

L'evento che si è verificato il 30 Ottobre 2012 (Fig. 54), il quale è caratterizzato da un'altezza d'onda di 7.8 m, ha le stesse caratteristiche evidenziate nei primi quattro scenari con intensi fenomeni di rifrazione nella parte a sud dell'area di studio che potrebbero provocare, vista la direzione del moto ondoso e l'orientamento della costa, forti correnti di ritorno. L'elevata altezza d'onda e di conseguenza gli elevati livelli di energia ad essa associata, amplificano i fenomeni sopra descritti.



## 6. Conclusioni

L'analisi degli eventi estremi è stata effettuata su una serie storica di dati ondometrici di circa 13 anni che comprende le acquisizioni delle boe di Capo Linaro (ISPRA-RON) e di Torrevaldaliga (ENEL) i cui dati determinano il clima ondoso a largo e lungo il tratto di costa che si estende da Capo Linaro a Punta del Pecoraro. Dallo studio emerge che i fenomeni più intensi provengono dal III quadrante (Libeccio e Mezzogiorno) rispetto a quelli provenienti da 315 °N (Maestrale). Dall'analisi statistica degli eventi estremi si evince che la distribuzione di Weibull ( $k=0.75$ ) è quella che meglio si adatta alla serie dei dati misurati ( $R^2=0.9$ ). Grazie a questa distribuzione sono stati definiti i tempi di ritorno delle altezze d'onda a 2, 5, 10 e 20 anni. Tale analisi non comprende gli eventi che si sono verificati negli ultimi mesi (Luglio-Dicembre 2012) tra cui è presente un fenomeno con un'altezza d'onda significativa di 7.8 m proveniente da Libeccio la cui intensità non risulta essere stata mai stata registrata prima. Tale fenomeno risulta inoltre avere un'altezza molto maggiore di quella stimata con un tempo di ritorno di 20 anni (6.8 m). Questo significa che l'analisi degli eventi estremi deve essere aggiornata inserendo anche i dati relativi all'ultimo periodo.

Per descrivere l'effetto del moto ondoso sulla zona costiera, gli scenari prodotti dall'analisi degli eventi estremi e l'evento con  $H_s$  pari a 7.8 m sono stati simulati grazie al modello STWAVE. Gli scenari relativi agli eventi di Libeccio provocano, nelle due baie a nord di Capo Linaro, zone di shoaling associate ad intensi fenomeni di rifrazione che possono determinare forti correnti di ritorno al centro delle stesse insenature. Il fenomeno di maggiore intensità riscontrato il 30 Ottobre del 2012 proveniente dalla stessa direzione amplifica i processi di shoaling e rifrazione nella parte a sud del tratto di costa oggetto di studio inducendo correnti costiere con un'elevata competenza, capaci di trasportare sul fondo o in sospensione un'elevata quantità di materiale sedimentario.

Nella parte a nord del tratto di costa oggetto studio, gli scenari relativi al Mezzogiorno e al Maestrale inducono, a causa della ripidità del profilo batimetrico, fenomeni di frangimento molto vicini alla linea di riva.



## BIBLIOGRAFIA

- Caputo C., D'Alessandro L., La Monica G.B., Landini B., Lupia Palmieri E. (1991) : *Present erosion and dynamics of Italian beaches*, Z, Geomorph.N.F., 81 Suppl., pag. 31-39.
- De Girolamo P., Belloni L., Milana G., Modini F., Piscopia R., Saltari D., (Università degli studi di Roma "La Sapienza", Regione Lazio Assessorato opere e reti di servizi e mobilità), 2001: "Caratterizzazione climatica e modellistica litoranea della coste laziali". Rapporto intermedio: "Studio meteomarino della costa laziale".
- Noli A., De Girololamo P., Sammarco P., 1996. *Parametri meteomarini e dinamica costiera*, In: Il Mare del Lazio, Università di Roma "La Sapienza"-Regione Lazio, pp 285-315
- Pinardi N., Arneri E., Crise A., Ravaioli M., Zavatarelli M.-2004 *The physical and ecological structure and variability of shelf areas in the Mediterranean Sea*, The Sea, Vol. 14, Chapter 32.
- Smith J.M., Sherlock A.R., Resio D.T. (2001): *STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model. User's manual for STWAVE, Version 3.0*, Coastal and Hydraulics Laboratory, ERDC/CHL SR-01-1.

## CARTE

- Istituto Idrografico Militare : *Carta nautica Scala 1:100000 Da Promontorio dell'Argentario a Capo Linaro–num.7.*
- Istituto Idrografico Militare : *Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani, Genova 1982*